

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

**Ověření technologie a svařitelnosti materiálu pro kryogenní
teploty**

**Verification Technology and Material Weldability for
Cryogenic Temperature**

Student:

Bc. Jiří Fizek

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2009

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě : 22. 5. 2009

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnou licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

22. 5. 2009
V Ostravě :

.....

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

FIZEK, J. Ověření technologie a svařitelnosti materiálu pro kryogenní teploty. Ostrava: Katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 90 s. Diplomová práce, vedoucí Ochodek, V.

Diplomová práce se zabývá ověřením technologie a svařitelnosti materiálů pro kryogenní teploty. V práci je provedena studie používaných materiálů pro kryogenní aplikace a rozbor vhodných technologií svařování se zaměřením na slitiny hliníku. V experimentální části je navržen a realizován modelový spoj ke kvalifikaci technologického postupu svařování vytvrditelné hliníkové slitiny. Pro zjištění chování hliníkové slitiny za nízkých teplot jsou provedeny některé zkoušky nad rámec požadavků příslušných norem. Dosažené výsledky jsou porovnány s literárními prameny a potvrzují, že hliník a jeho slitiny jsou vhodným materiálem pro kryogenní použití, ale jeho svařitelnost je spojena se specifickými problémy.

ANNOTATION OF THE THESIS

FIZEK, J. Verification Technology and Material Weldability for Cryogenic Temperature. Ostrava: Department of mechanical technology, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2009, 90 p. Thesis, head: Ochodek, V.

The thesis deals with the verification of the technology and the weldability of materials for cryogenic temperatures. The study of used materials for cryogenic application and the analysis of suitable welding technologies with focusing on aluminum alloys is carried out in this work. The model joint for qualification of welding procedure of heat-treatable aluminum alloy is designed and realized in the experimental part of the thesis. For finding of aluminum alloy behavior at low temperatures were carried out some tests beyond requirements of respective standards. The results are compared with literature source-book and prove aluminum and its alloys are suitable material for cryogenic application but its weldability is associated with specific problems.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ.....	8
1. ÚVOD	9
2. CHARAKTERISTIKA MATERIÁLŮ PRACUJÍCÍCH ZA KRYOGENNÍCH TEPLOT.....	11
2.1 OCELI PRO KRYOGENNÍ TEPLoty	11
2.1.1 Oceli legované niklem	12
2.1.2 Austenitické korozivzdorné oceli	15
2.2 SLITINY NIKLU	16
2.3 SLITINY MĚDI	16
2.4 HLINÍK A JEHO SLITINY	17
2.4.1 Označování hliníku a slitin hliníku podle ČSN EN.....	17
2.4.2 Mechanické vlastnosti hliníku a jeho slitin za nízkých teplot	18
2.4.3 Lomové vlastnosti	20
2.4.4 Precipitační zpevnění – vytvrzování	21
2.4.5 Tvářené slitiny pro nízkoteplotní aplikace.....	23
3. SVAŘITELNOST A TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ HLINÍKU A JEHO SLITIN	27
3.1 SVAŘITELNOST HLINÍKU A JEHO SLITIN	27
3.2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ HLINÍKU A JEHO SLITIN	34
4. NÁVRH A REALIZACE MODELOVÉHO SPOJE KE KVALIFIKACI TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU SVAŘOVÁNÍ HLINÍKOVÉ SLITINY.....	40
4.1 VÝBĚR ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU	40
4.1.1 Chemické složení a mechanické vlastnosti hliníkové slitiny EN AW-6063 T66 [AlMgSi].....	40
4.2 VÝBĚR PŘÍDAVNÉHO MATERIÁLU	41
4.3 NÁVRH SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ P(WPS)	41
4.4 ZÁZNAM PRŮBĚHU SVAŘOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH KUSŮ	41
4.5 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	42
5. KONTROLA A ZKOUŠENÍ ZKUŠEBNÍCH KUSŮ.....	43
5.1 ROZSAH ZKOUŠENÍ.....	43
5.2 NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY.....	43
5.2.1 Vizuální kontrola	43
5.2.2 Radiografická zkouška	43
5.2.3 Kapilární zkouška.....	43
5.3 DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY	44
5.3.1 Příčná zkouška tahem.....	44
5.3.2 Příčná zkouška lámavosti	46
5.3.3 Makroskopická a mikroskopická kontrola svarových spojů	47
5.3.4 Zkouška rázem v ohybu	48
5.3.5 Zkouška tvrdosti	50
6. DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	52
7. ZÁVĚR	55
8. SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ	56
SEZNAM PŘÍLOH:	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.

Seznam použitého značení

Symbol/Zkratka	Název	Jednotka
A	tažnost	[%]
AISI	The American Iron and Steel Institute	[-]
I	svařovací proud oblouku	[A]
KC	vrubová houževnatost	[J/cm ²]
KV	nárazová práce	[J]
L _o	počáteční měřená délka zkušební tyče	[mm]
L _u	konečná měřená délka zkušební tyče	[mm]
MIG	Metal Inert Gas	[-]
PM	přídavný materiál	[-]
pWPS	předběžný technologický postup svařování	[-]
Q	tepelný příkon	[kJ/mm]
R _e	mez kluzu	[MPa]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
SK	svarový kov	[-]
S _o	počáteční průřez vzorku	[mm ²]
S _u	průřez vzorku v místě lomu	[mm ²]
T _i	teplota interpass	[°C]
TIG	Tungsten Inert Gas	[-]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	[-]
T _p	teplota předehřevu	[°C]
U	napětí oblouku	[V]
v	rychlost svařování	[mm/s]
v _k	kritická rychlost ochlazování	[°C/s]
WIG	Wolfram Inert Gas	[-]
ZM	základní materiál	[-]

1. Úvod

Kryogenikou se rozumí pracovní obor zabývající se vytvářením nebo využíváním nízkých a velmi nízkých teplot. Výraz cryogen se objevil asi před 100 lety jako označení mrazicí směsi. Pochází z řečtiny, kde kryos znamená mráz a genos rod nebo původ. Často je užívána předpona kryo- (např. kryogenní kapalina, kryogenní zařízení).

Obor nízkých teplot začíná pod teplotou bodu mrazu 273,15 K a jeho dolní hranicí je v současné době teplota řádu 10^{-8} K. Je to velmi rozsáhlá teplotní oblast se vzájemně odlišnou problematikou a potřebnými technickými prostředky, že je nutné ji rozdělit do několika částí:

1. Teplotní oblast nad 120 K dosažitelná běžnou chladicí technikou se využívá hlavně v potravinářství, částečně i v biologii a medicíně.

2. Oblast nízkých teplot 5 až 120 K je hlavní doménou kryotechniky. Patří sem řada kapalných plynů, jejichž normální bod varu nepřekračuje 120 K. Je to např. zkapalněný přírodní plyn (LNG), kapalný dusík (LN_2), kapalná kyslík (LO_2 nebo LOX), kapalný neon (LNe), kapalný vodík (LH_2) a konečně kapalně helium (LHe). Písmeno „L“ znamená „liquid“ – kapalný.

3. Oblast velmi nízkých (heliových teplot) označuje teploty nižší, než je kritická teplota ^4He , tj. 5,2 K. [1]

Kryotechnika má desítky let své nezastupitelné místo nejen v základním fyzikálním výzkumu a v dalších vědních oborech, ale stává se důležitým činitelem v řadě průmyslových aplikací.

Teploty nižší než 120 K (-153°C) jsou potřebné pro zkapalnění vzduchu a průmyslovou výrobu jeho složek, kyslíku, dusíku a argonu. Rovněž pro zkapalnění zemního plynu, vodíku a helia a výrobu dalších vzácných plynů. S kryogenikou úzce souvisí obor skladování, dopravy a použití technických plynů, mezi které zahrnujeme další plyny jako oxid uhličitý a oxid dusný.

Na těchto technologiích závisí moderní výroba oceli, syntetických hnojiv, motorových paliv. Kapalný zemní plyn a kapalný vodík jsou perspektivní paliva pro vozidla. Chlazení supravodivých magnetů kapalným heliem umožňuje základní fyzikální výzkum v urychlovačích, provoz lékařských tomografů i pohyb vlaku na magnetickém polštáři. Kapalný dusík je důležitý pro uchovávání buněk v genetice, při transplantacích a operacích, ale také pro hluboké zmrazování potravin. Vzácné plyny

neon, krypton a xenon se používají ve svítlidlech. Kyslík se používá při svařování a řezání kovů. Svařovací technika však potřebuje řadu směsí argonu, vodíku, oxidu uhličitého a dusíku. Dusík je nezbytnou inertní atmosférou při skladování kapalných paliv.

Zadání diplomové práce vyplývá z požadavků zadavatele fy Eneza, s.r.o., který se zabývá montáží, opravou a údržbou energetických zařízení a jeho záměrem je rozšířit kvalifikace svařování materiálů typu ocel používaných v energetice na materiály pro kryogenní aplikace. Výše zmiňovaná firma provádí mj. údržbu a opravy zařízení pro Linde Gas a.s. Třinec.

Z důvodu toho, že hliník a jeho slitiny jsou jedním druhem materiálů vhodných pro nízké a kryogenní teploty a protože zadavatel dosud nemá kvalifikaci postupu svařování na tento typ materiálu, byl pro experimentální část diplomové práce navržen a realizován modelový spoj konkrétní vytvrditelné hliníkové slitiny.

Přínos diplomové práce spočívá v rozšíření spektra materiálů, na které zadavatel získá kvalifikaci postupu svařování.

2. Charakteristika materiálů pracujících za kryogenních teplot

Použití materiálů při nízkých teplotách vyvolává zvláštní problémy, které musí být brány v úvahu. Obzvláště je třeba věnovat pozornost změnám mechanických vlastností, roztažnosti, kontrakci a tepelné vodivosti různých materiálů. Nejdůležitější vlastností, kterou je při nízkých teplotách nutno brát v úvahu je houževnatost materiálu. Rozsah výběru materiálů při navrhování zařízení pro kryogenní aplikace je limitován problematikou zkřehnutí materiálů za nízkých teplot.

Pro oblast kryogenních teplot se dlouho používala měď, hliník a jeho slitiny a v současnosti zejména niklem legované a austenitické oceli a rovněž i slitiny niklu. Tabulka 1 (v Přílohách) uvádí přehled teplot zkapalněných plynů a materiály, které se pro jednotlivé tepelné oblasti používají.

2.1 Oceli pro kryogenní teploty

Ocelové svařované konstrukce pracující v podmínkách nízkých teplot musí splňovat několik základních předpokladů. Základní podmínkou je u těchto materiálů vysoká úroveň plasticity při dané pracovní teplotě. Při navrhování konstrukcí se nesmí však zapomenout ani na pevnostní charakteristiky materiálů.

Výrazný vliv na hodnotu přechodové teploty má čistota oceli. Křehnutí nelze ovšem redukovat jen na vliv nečistot. Přispívají k němu i nevhodné strukturní charakteristiky, malá teplotní stálost vyloučených minoritních fází a velikost původního austenitického zrna.

Podle minimální pracovní teploty můžeme konstrukční materiály pracující v oblasti kryogenních teplot rozdělit do třech základních skupin:

1. oceli pracující do teplot -50°C (konstrukční jemnozrnné mikrolegované oceli)
2. oceli pracující do teplot -100°C (nízkolegované oceli s obsahem niklu od 2,5 do 6%)
3. oceli pracující do teplot blízkých se teplotě absolutní nuly (9%, 12% Ni ocele martenziticky vytvrditelné, manganové oceli, austenitické CrNi, či MnCr ocele a slitiny).

Materiály skupin 2. a 3. se nejčastěji používají na výrobu nádob na zkapalněné plyny.

2.1.1 Oceli legované niklem

Přísada niklu zvyšuje kalitelnost oceli a zvyšuje její vrubovou houževnatost při nízkých teplotách. Ni není karbidotvorným anebo nitridotvorným prvkem a zůstává v substitučním tuhém roztoku v α -Fe. Zvýšená kalitelnost niklem legovaných ocelí následně snižuje výskyt kalicích trhlin, protože umožňuje použití méně „drastického“ kalení. Tím, že Ni snižuje teplotu M_s oceli, snižuje i možnost samopopouštění martenzitu. Vyšší obsah Ni v oceli vede ke vzniku martenzitické anebo austenitické mikrostruktury.

Niklem legované oceli pro nízkoteplotné aplikace musí mít vysoký stupeň čistoty (nízký obsah P + S), pečlivou kontrolu intersticiálních prvků, uhlíku a dusíku, přísadu malého množství hliníku anebo jiných prvků, které vážou intersticiální atomy, včetně kyslíku a nakonec vhodnou kombinací slitinových prvků, zejména Mn a Mo, aby se získala požadovaná hladina pevnosti a houževnatosti při přiměřené ceně.

Příklady ocelí legované niklem se zaručenými vlastnostmi při nízkých teplotách dle ČSN EN 10028-4 [3] včetně chemického složení jsou uvedeny v tabulce 2 (v Přílohách). Oceli lze rozdělit do 5 základních skupin. [2]

1. Oceli s nízkým obsahem Ni (do 2,5%). Používají se v normalizačně žíhaném a popouštěném stavu anebo v zušlechťeném stavu. Niklem legovaný ferit jim dává dobrou houževnatost při záporných teplotách.
2. Oceli se středním obsahem Ni (3,5%). Kromě aplikací jako kryogenické materiály se používají také jako materiály na rotory turbín a velké výkovky. Mají nízký obsah uhlíku ($<0,20\%$), obsah Mn do 0,8%, střední obsah Si v rozmezí 0,15-0,30%, nízký obsah nečistot a v některých případech jsou nízkolegované molybdenem (do 0,30%) a chromem do 1%.
3. Oceli s obsahem $5\div 6\text{Ni } \%$ se vyvíjely jako ekonomičtější varianta 9% Ni ocelí, protože mají přibližně stejnou houževnatost při záporných teplotách a o něco nižší pevnost. Obsah uhlíku v těchto ocelích je nižší než v ocelích předcházející skupiny ($<0,12\%$), obsah křemíku je stejný, ale obsah manganu může být úplně rozdílný 0,3-1,0% anebo 1,5-4,5%.
4. 9% Ni oceli představují základní niklovou kryogenní ocel, má vynikající houževnatost při velmi nízkých teplotách, založenou na přítomnosti houževnatého „niklového“ feritu. Malé množství stabilního austenitu, který se tvoří během popouštění, nepřímo zvyšuje houževnatost oceli tím, že v sobě

rozpouští přebytečné intersticiály. Oceli této skupiny mají nízký obsah uhlíku ($<0,10\%$), obsah Si v rozmezí $0,15-0,30\%$, Mn do 1% a velmi nízký obsah nečistot. Pro kontrolu obsahu kyslíku se obvykle používá dezoxidace hliníkem, jehož přísada navíc zjemňuje zrna. Když se do oceli dále přidá malé množství molybdenu ($\sim 0,30\%$), bude méně náchylná na popouštěcí křehkost.

5. 12% Ni jemnozrnné oceli představují nejhouževnatější druh feritické oceli, v které je přísadou niklu potlačená teplota houževnatě-křehkého přechodu pod $4,2\text{K}$. Extrémně jemnozrnná struktura se získá čtyřstupňovým anebo pětistupňovým cyklickým tepelným zpracováním mezi teplotami 730 a 650°C . Pro získání extrémně jemného zrna přispívá i přísada $0,20-0,25\%$ Ti.

Svařitelnost ocelí legovaných niklem [2]

Svařitelnost kryogenních ocelí závisí především od druhu oceli. První skupina – jemnozrnné mikrolegované oceli mají velmi dobrou svařitelnost a pro zjištění podmínek svařování můžeme použít všechny postupy uvedené v normách pro konstrukční oceli.

U ocelí nižších pevností a malých tloušťek nejsou žádné limitující podmínky svařitelnosti. V případě větších tloušťek (30 mm a více) je zapotřebí vzít v úvahu, že tlakové nádoby anebo zásobníky se budou žíhat anebo podrobovat se mechanickým způsobem relaxace. Ty však vyžadují dle možností co nejhomogennější spoj. Jiným problémem může být dosažení požadované houževnatosti v tepelně ovlivněné oblasti anebo ve svarovém kovu. V úvahu proto přichází limitování měrného příkonu svařování anebo použití přídavných materiálů s vyšším stupněm legování. Pro oblast kryogenních teplot do -60°C se používá už niklem legované přídavné materiály od 1 do $2,5\%$ Ni. Tyto materiály mohou vyžadovat použití předehřevu.

Při svařování nízkolegovaných Ni-ocelí ($1-3,5\%$) musíme uvážit, že mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti bude martenzitická anebo martenziticko-bainitická, a z toho důvodu je nutné používat ke svařování pouze nízkovodíkové přídavné materiály. Vznikající martenzit je sice dostatečně houževnatý, ale je i citlivý na účinky vodíku, protože podíl stabilního austenitu v něm je ještě nepatrný. Zkřehujícím mechanismem v takovéto struktuře může být růst γ -zrn, což vede k potřebě limitování měrného příkonu svařování. Stejným nebezpečím může být zvýšená náchylnost k likvačnímu praskání oceli. Legování oceli niklem může vést k částečné vazbě síry na sulfid niklu Ni_3S s nízkou teplotou tavení.

Přídavné materiály s vyšším obsahem niklu (zejména 3,5% Ni) mohou být také náchylné na praskání za horka (krystalizační). Požadavek limitování maximální tvrdosti podhousenkové zóny (např. na 250 HV – max.) může být často nesplnitelná bez použití tzv. žíhacích vrstev svarů, které se kladou na hranu poslední vrstvy svarového kovu vyšší proudovou zátěží. Úlohou těchto vrstev je jednak zlepšit metalurgickou mikrostrukturu podhousenkové zóny tím, že se její struktura „popustí“, jednak přenést tahová pnutí do této vrstvy, a naopak, do oblasti podhousenkové zóny indukovat tlakové zbytkové napětí.

Svařitelnost 5 a 9 % Ni ocelí je ovlivněná především komplikovaným tepelným zpracováním základního materiálu. Toto zpracování se zakládá na kalení, popouštění a reverzním žíhání. Během svařování však působí na ocel pouze jednoduchý tepelný cyklus svařování, který v zóně vyhřáté nad teploty A_3 eliminuje účinky takového zpracování. Houževnatost oblasti svaru je proto nižší než základního materiálu a pro získání stejné houževnatosti je zapotřebí svarový spoj tepelně zpracovat. Tepelné zpracování velmi rozměrných těles je ale obtížné až nemožné, proto se musí obvykle přistoupit k jiné alternativě: limitovaný měrný příkon svařování, aby šířka tepelně ovlivněné oblasti byla co nejmenší. Tepelně ovlivněná oblast je charakterizována dvěma znaky: její mikrostruktura, prakticky nezávisle od použitého příkonu svařování anebo teploty přehřevu je martenzitická, přinejlepším bainiticko-martenzitická. I přesto není za běžných podmínek svařování náchylná na studené praskání, protože obsahuje dostatečné množství zbytkového austenitu, který je schopen rozpustit v sobě vodík a tak eliminovat jeho nepříznivý účinek. Druhým jevem je růst γ -zrn v podhousenkové zóně. Snížení houževnatosti je spojeno se zodpovědnými změnami v mikrostruktuře: jemnozrnný martenzit se mění na deskový a zvětšuje se rozměr austenitického zrna. Houževnatost tepelně ovlivněné oblasti je možno vylepšit žíháním při teplotě 650°C s následujícím rychlým ochlazením. Pokles houževnatosti v tepelně ovlivněné oblasti 9 % Ni oceli není natolik výrazný jako u 5 % Ni oceli. S výjimkou přechodové zóny je možno získat ve všech zónách tepelně ovlivněné oblasti dostatečnou houževnatost i při teplotě tekutého dusíku. Souvisí to s větším podílem zbytkového austenitu.

Svařitelnost 12 % Ni oceli se blíží svařitelnosti 9 % Ni oceli. [2]

Tabulka 6 (v Přílohách) uvádí vhodné přídavné materiály pro nízkoteplotní a kryogenní aplikace podle označení platných norem. [8]

2.1.2 Austenitické korozivzdorné oceli.

V oblasti nejnižších kryogenních teplot se nejčastěji používají austenitické oceli. Základním představitelem austenitických ocelí je ocel typu X5CrNi18-10 (ČSN EN 10027-1 [4]) AISI 304. Austenitické ocele je možno dále dělit na nestabilní a stabilní podle toho, jestli vlivem poklesu teploty a působením deformace dochází u nich k martenzitické přeměně nebo si austenitickou strukturu zachovávají. Mezi nestabilní patří např. Cr18Ni(8-10). Mezi stabilní se řadí ocele typu Cr25Ni20. Přehled pevnostních vlastností za různých teplot vybraných austenitických korozivzdorných ocelí pro kryogenní aplikace je uveden v tabulce 3 (v Přílohách) [5].

Z hodnot uvedených v tabulce 3 je vidět, že austenitické nerezavějící oceli si za kryogenních teplot udržují vysokou tažnost. Dále mez kluzu a pevnost v tahu těchto ocelí se zvyšuje se snižující se teplotou s tím, že zvýšení je patrnější u pevnosti v tahu. Jedinou výjimkou je ocel X8CrNi25-21, u které je zvýšení meze kluzu téměř stejné jako zvýšení pevnosti v tahu. Toto chování lze vysvětlit tím, že obsah uhlíku v oceli X8CrNi25-21 je o něco vyšší než u ostatních ocelí uvedených v tabulce 3. Intersticiální prvky, jako je uhlík, jsou známy tím, že mají výrazný vliv na mez kluzu u slitin vystavené nízkým teplotám. Již z hodnot tažnosti se dá očekávat, že houževnatost těchto ocelí za kryogenních teplot je vynikající. Výsledky nárazové práce provedené za při 25°C, -196°C a -254°C u vybraných austenitických korozivzdorných ocelí jsou uvedeny v tabulce 4 (v Přílohách). Houževnatost těchto ocelí se poněkud sníží, když teplota poklesne na hodnotu -196°C, ale při dalším snížení na hodnotu -254°C zůstává přibližně stejná.

V tabulce 5 (v Přílohách) jsou uvedeny výsledky nárazové práce u oceli typu X5CrNi18-10, která byla po dobu jednoho roku vystavena teplotě -196°C. Tyto výsledky naznačují, že ocel tohoto typu je velice stabilní a nevykazuje žádný výrazný pokles houževnatosti v důsledku dlouhodobému vystavení teplotě -196°C.

Svařitelnost austenitických korozivzdorných ocelí [2]

Pro svařování austenitických ocelí se používají přídavné materiály dávající stejné anebo příbuzné chemické složení, jako má svařovaná ocel. Při svařování nepoužíváme přehřev, poněvadž by mohl nepříznivě ovlivnit korozní odolnost spoje. Obvykle limitujeme při svařování příkon na ~ 15 kJ/cm a maximální mezihousenkovou (interpass) teplotu na 150°C.

Tabulka 6 (v Přílohách) uvádí vhodné přídavné materiály pro svařování vybraných austenitických korozivzdorných ocelí používaných v kryogenice [8].

Austenitické korozivzdorné oceli je možno svařovat téměř všemi známými metodami svařování. Upozorňuje se pouze na nutnost ochrany svařovacího oblouku, aby nedocházelo k oxidaci slitinových prvků, a naopak aby se nezvyšoval obsah těch příměsí, které mají nepříznivý vliv na celistvost a vlastnosti (např. korozní odolnost) spoje. Pozornost je třeba věnovat zejména faktorům zvyšující obsah uhlíku a pak plynům, které by mohly způsobit pórovitost svarů. V úvahu je zapotřebí vzít i malou tepelnou vodivost austenitických ocelí a velký koeficient tepelné roztažnosti.

2.2 Slitiny niklu

Jsou pevné, odolné vůči korozi a mají nízkou tepelnou vodivost, proto jsou často užívány v nízkoteplotních aparaturách. Patří mezi ně kupronikl (30% Ni, 0,7% Fe, 0,8% Mn, zbytek Cu), Inconel (80 Ni, 14 Cr, 6 Fe), Monel (68 Ni, 3 Fe, 0,5 až 1,25 Mn, zbytek Cu), německé stříbro (60 až 65 Cu, 20 Ni, 20 až 15 Zn), které je však náchylnější ke korozi než slitiny s vyšším obsahem Ni a kovár (29 Ni, 17 Co, 53,7 Fe, 0,3 Mn) [1].

Nikl a jeho slitiny se svařují všemi procesy, které se používají při svařování ocelí – obloukové metody, elektrickým odporem, třením, elektronovým paprskem a u malých tloušťek laserem. Při výběru přídavného materiálu se držíme zásady, že chemické složení svarového kovu by mělo být podobné jako je složení základního materiálu. Při svařování niklu a jeho slitin nepoužíváme přehřev a mezihousenková teplota je limitovaná směrem nahoru na $\sim 100^{\circ}\text{C}$. Po svaření se obvykle neaplikuje tepelné zpracování pro Ni, Ni-Cu, Ni-Cr a Ni-Fe-Cr slitiny. Jejich korozní odolnost je dostatečná i ve stavu po svaření [2].

2.3 Slitiny mědi

Slitiny mědi jsou za nízkých teplot přibližně stejně dobře tvárné jako při pokojové teplotě, avšak zvyšuje se mez jejich pevnosti. Ze slitin jsou nejznámější α -mosazi (Cu + Zn), jejichž pevnost s obsahem Zn roste. Mosazi obsahující několik procent nerozpustného Pb (automatové mosazi) nelze doporučit zvláště pro tenkostěnné součásti, poněvadž v nich snadno vznikají póry, zvláště při tvrdém pájení. Vhodnější je tzv. nábojnicová mosaz (do 0,1% Pb).

Mezi nejčastěji používané slitiny mědi v kryogenice patří např. CuZn28Sn1; CuNi30Mn1Fe; CuBe2 – označení dle ISO 1190-1:1982 [10]

Všeobecně jsou mosazi nepoužitelné tam, kde jsou součásti svařovány elektronovým paprskem nebo pájeny ve vakuové peci, poněvadž složky jako Zn a Pb se při zvýšené teplotě ve vakuu silně odpařují. Některé druhy mosazi mohou být za He teplot slabě feromagnetické [1].

2.4 Hliník a jeho slitiny

Z důvodu toho, že experimentální část práce je zaměřena na kvalifikaci technologického postupu svařování hliníkové slitiny, bude věnována širší pozornost hliníku a jeho slitinám včetně rozboru svařitelnosti a technologie svařování.

Hliníkové slitiny představují velmi důležitou třídu konstrukčních materiálů pro aplikace, kde se provozní teploty pohybují pod bodem mrazu a jsou používány pro konstrukční součásti pracující za teplot až -270°C.

2.4.1 Označování hliníku a slitin hliníku podle ČSN EN

a) Označování hliníku a slitin hliníku pro tváření dle ČSN EN 573-1 až 3 [11]

Tyto normy platí pro tvářené výrobky a ingoty určené ke tváření a stanoví označování písmeny EN AW a čtyřmi číslicemi. Číselné označení lze doplnit chemickým označením, např. EN AW-5052 [AlMg2.5].

Jednotlivé části označení následují v pořadí:

- předpona EN následována mezerou,
- písmeno A určuje hliník,
- písmeno W určuje tvářené výrobky,
- spojovací čárka,
- čtyři číslice označují chemické složení.

V čtyřmístném číselném označení udává první ze čtyř číslic skupinu slitin podle hlavních slitinových prvků:

řada 1000 – Al minimálně 99.00% a více

řada 2000 – slitina AlCu - jsou tepelně zpracovatelné

řada 3000 – slitina AlMn - nejsou tepelně zpracovatelné

řada 4000 – slitina AlSi - nejsou tepelně zpracovatelné

řada 5000 – slitina AlMg - nejsou tepelně zpracovatelné

řada 6000 – slitina AlMgSi - jsou tepelně zpracovatelné

řada 7000 – slitina AlZn - jsou tepelně zpracovatelné

řada 8000 – slitina Al s různými prvky

b) Označování slitin hliníku na odlitky dle ČSN EN 1706 [12]

Tato norma platí pro odlitky a stanoví označování písmeny EN AC a pěti číslicemi. Číselné označení lze doplnit chemickým označením, např. EN AC-21000 [AlCu4MgTi].

Jednotlivé části označení následují v pořadí:

- předpona EN následována mezerou,
- písmeno A určuje hliník,
- písmeno C určuje odlitky,
- spojovací čárka,
- čtyři číslice označují chemické složení.

První z pěti číslic v pětimístném číselném označení udává skupinu slitin stejně jako u slitin pro tváření podle hlavních slitinových prvků:

řada 10000 – Al minimálně 99.00% a více

řada 20000 – slitina AlCu

řada 30000 – slitina AlMn

řada 40000 – slitina AlSi

řada 50000 – slitina AlMg

řada 60000 – slitina AlMgSi

řada 70000 – slitina AlZn

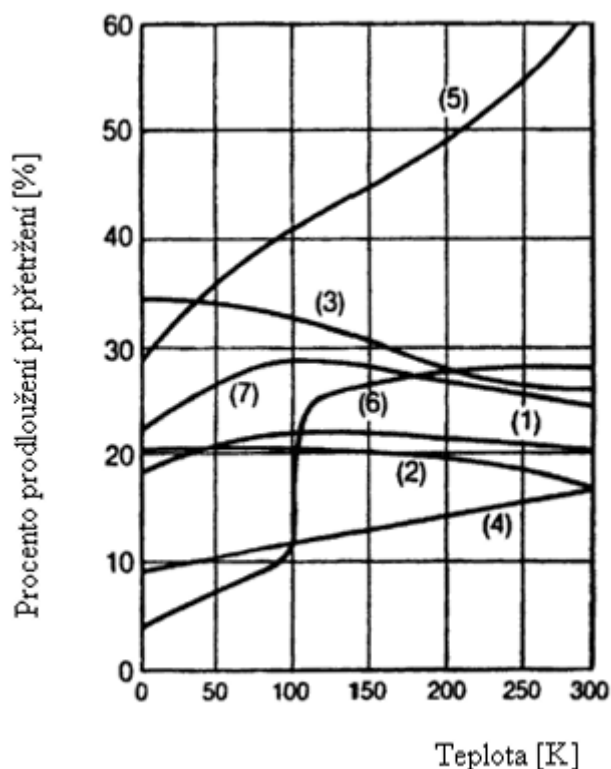
řada 80000 – slitina Al s různými prvky

2.4.2 Mechanické vlastnosti hliníku a jeho slitin za nízkých teplot

Hliníkové slitiny, stejně jako většina slitin neželezných kovů, má vlastnosti v některých případech při nízkých teplotách dokonce lepší než při teplotách pokojových. Tato schopnost, spojená s kubickou plošně centrovanou mřížkou, významným způsobem zjednodušuje zkoušení vlastností na rozdíl od ocelí (zejména feritických), u kterých je přechod k nízkým teplotám spojen s řadou náročných zkoušek

v oblasti lomových vlastností. Typické vlastnosti za nízkých teplot jsou pro vybrané slitiny hliníku uvedeny v tabulce 7 (v Přílohách).

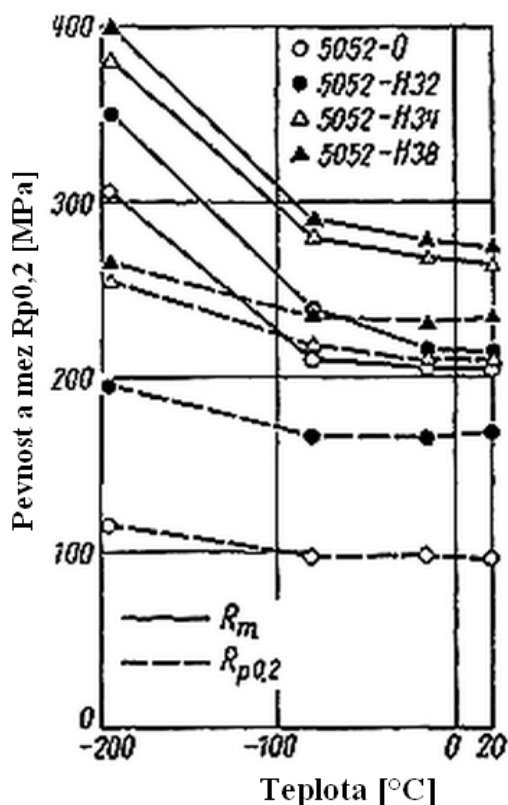
Na obr. 1 jsou graficky zpracovány křivky tažnosti vs. teplota pro několik významných konstrukčních materiálů. Z obrázku lze mj. vypožorovat, že tažnost slitiny hliníku EN AW-2024 T4 (1) se v rozmezí teplot 0 až 300 K nijak zvlášť dramaticky nemění na rozdíl od např. uhlíkové oceli C22 (6). Což je jedním z důvodů proč je hliník a jeho slitiny vhodný konstrukční materiál pro nízké až kryogenní teploty.



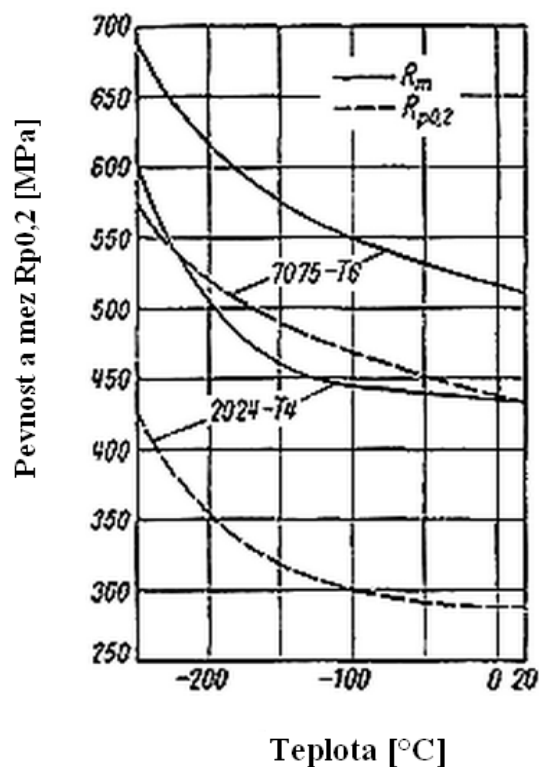
Obr. 1. Křivky tažnosti vs. teplota pro několik významných konstrukčních materiálů. (1) slitina hliníku 2024 T4; (2) beryliová měď; (3) K Monel; (4) Titan; (5) 304 (AISI) korozivzdorná ocel; (6) uhlíková ocel C22; (7) 9% niklová ocel [5].

Změny mechanických vlastností mají s klesající teplotou u nevytvrditelných i vytvrditelných slitin velmi podobný průběh.

Závislosti pevnostních hodnot na teplotě v rozmezí 20 až -200 °C pro slitinu 5052 (AlMg2.5) a slitiny 7075-T6 (AlZn6MgCu) a 2024-T4 (AlCu4Mg1) jsou graficky zpracovány na obr. 2 a obr. 3. Z uvedené tabulky 7 a grafického zpracování vyplývá, že od pokojové teploty až zhruba do -100 °C pevnostní hodnoty mírně stoupají, při dalším poklesu teploty je však vzrůst daleko rychlejší. Zajímavé je, že u nevytvrditelných slitin nemá stupeň zpevnění na charakter těchto závislostí prakticky žádný vliv (obr. 2).



Obr. 2. Změny vlastností u různě zpevněné slitiny AlMg2.5 s klesající teplotou [14]



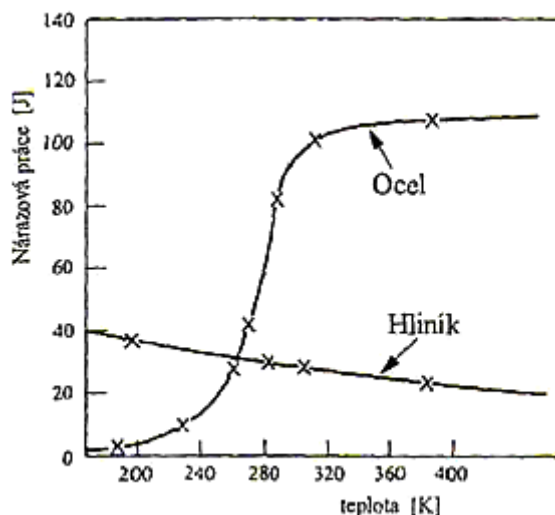
Obr. 3. Změny vlastností vytvrditelných slitin AlZn6MgCu (7075-T6) a AlCu4Mg1 (2024-T4) s klesající teplotou [14]

Slévárenské slitiny se při nízkých teplotách chovají prakticky stejně jako slitiny určené pro tváření. Vlastnosti při nízkých teplotách ovlivňuje jak chemické složení a charakter precipitačního vytvrzení, tak způsob lití (do písku, do kokily, speciální způsoby lití). S klesající teplotou se zvyšují pevnostní vlastnosti poměrně rovnoměrně.

2.4.3 Lomové vlastnosti

V praxi se velmi často setkáváme s případem, kdy v materiálu konstrukce existují vady nebo trhliny, které ovlivňují odolnost konstrukce proti statickému nebo únavovému namáhání. U některých typů konstrukcí se při snaze zvýšit její životnost předpokládá přítomnost těchto vad a jejich rozvoj do podkritických rozměrů. Při dosažení tzv. kritické délky defektu dochází k porušení konstrukce. Proto je nutné konstrukční materiály určené pro tyto aplikace charakterizovat z hlediska odolnosti proti vzniku a šíření těchto trhlin a definovat kritické rozměry trhlin pro dané podmínky zatěžování.

Z hlediska lomových vlastností se slitiny hliníku významně liší od ocelí. Zatímco u ocelí jsou lomové vlastnosti výrazně závislé na teplotě (přechod ke křehkému lomu při tzv. přechodové teplotě), u hliníkových slitin se lomové vlastnosti s klesající teplotou nejen významně nemění, ale v řadě případů i zlepšují. Je to dobře patrné z obr. 4., kde je vynesena pro ocel a hliník nárazová práce při zkoušce vrubové houževnatosti.



Obr. 4. Porovnání vlivu teploty na lomové chování oceli a hliníku [14]

Pro porušení při statickém zatížení, kdy působící napětí je kolmé na otevírající se trhlinu, je definována kritická hodnota faktoru intenzity napětí K_{IC} , při které dojde k lomu. Tato hodnota se nazývá lomová houževnatost a charakterizuje odolnost materiálu proti křehkému porušení. Hodnoty lomové houževnatosti lze zjistit experimentálně poměrně náročnými zkouškami, z literatury nebo z některých normativních předpisů. Hodnoty lomové houževnatosti však nelze chápat jako materiálové konstanty, protože závisí na řadě vlivů.

Čím vyšší jsou hodnoty K_{IC} , tím vyšší je houževnatost. Pro konstrukční aplikace je samozřejmě příznivé pokud jsou společně s vysokými hodnotami K_{IC} vysoké i charakteristiky zjištěné zkouškou tahem (R_m , $R_{p0,2}$, A). Mezi pevností, tvrdostí a lomovou houževnatostí však obecně neexistuje žádná typická závislost nebo těsná korelace. Z kvalitativního hlediska lomová houževnatost klesá s rostoucí pevností.

2.4.4 Precipitační zpevnění – vytvrzování

Vytvrzováním se dají ve značném rozsahu měnit mechanické, fyzikální i technologické vlastnosti slitin. Podmínkou je, že tyto slitiny mají z hlediska příslušného rovnovážného diagramu výraznou změnu rozpustnosti legujícího prvku / prvků na

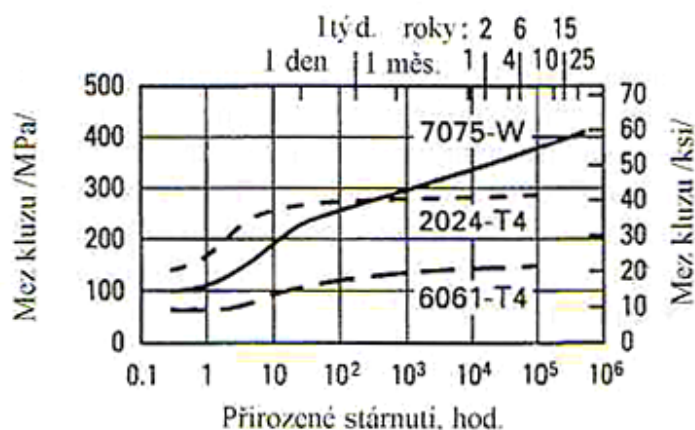
teplotě. Změna rozpustnosti v tuhém roztoku α je tedy základním předpokladem pro vznik přesyceného tuhého roztoku α .

Vytvrzování se skládá ze dvou technologických úkonů, které na sebe navazují a vzájemně souvisí do té míry, že každé dílčí provedení ovlivňuje konečný výsledek. Jedná se o:

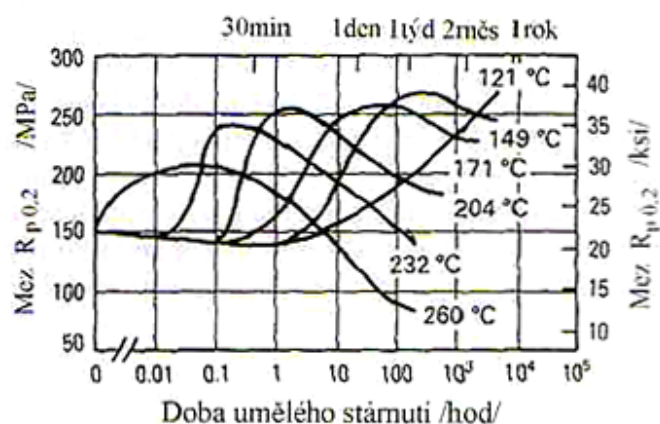
- **rozpouštěcí žíhání** – je ohřev na vhodnou rozpouštěcí teplotu, výdrž na této teplotě po dobu nutnou k převedení jedné nebo více intermetalických fází do tuhého roztoku (např. CuAl_2 , Mg_2Si) a následující rychlé ochlazení kritickou nebo nadkritickou rychlostí k získání prosyceného tuhého roztoku α . Kritická rychlost ochlazování je nejmenší rychlost ochlazování z rozpouštěcí teploty, při které nenastává rozpad přesyceného tuhého roztoku.
- **stárnutí** – je proces, při kterém dochází ke změně substrukтуры a v důsledku toho i ke změně mechanických, fyzikálních i technologických vlastností. Může se realizovat buď za pokojové teploty (přirozené stárnutí), nebo za zvýšených teplot (umělé stárnutí). Někdy se z technologických důvodů realizuje stupňovité stárnutí, což je proces tepelného zpracování po rozpouštěcím žíhání uskutečněný při dvou nebo více teplotách, které se zvyšují během tohoto žíhacího cyklu.

K tomuto způsobu zpevňování jsou vhodné základní systémy Al-Cu-Mg (slitiny řady 2xxx), Al-Mg-Si (6xxx) a Al-Zn-Mg-Cu (7xxx).

Příklad změn meze $R_{p0,2}$ v průběhu přirozeného stárnutí tří typických představitelů vytvrditelných slitin Al jsou uvedeny na obr. 5. Jedná se o slitiny Al se střední pevností (AA6061) a vysokou pevností (AA2024 a AA7075). Příklad změn mech. vlastností v průběhu umělého stárnutí u slitiny AA6061 je uveden na obr. 6.

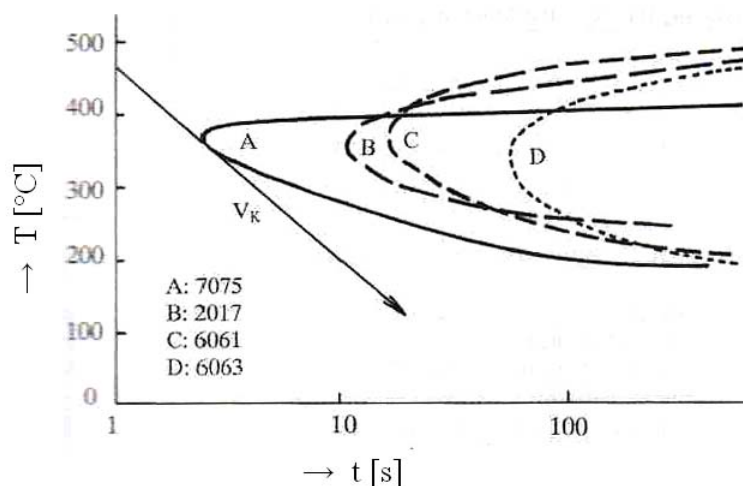


Obr. 5. Změny $R_{p0,2}$ v průběhu přirozeného stárnutí typických vytvrditelných slitin Al [14].



Obr.6. Změny $R_{p0.2}$ u slitiny AA6061 v průběhu umělého stárnutí při různých teplotách [14].

V souvislosti s kritickou rychlostí ochlazování – v_k – je nutno se zmínit o „C“ křivkách, které se uplatňují v technologii tepelného zpracování Al slitin. Na obr. 7 jsou uvedeny C křivky pro čtyři slitiny, a to EN AW-7075, EN AW-2017, EN AW-6061, EN AW-6063. Kritická rychlost ochlazování je vynesena pro slitinu EN AW-7075. Touto rychlostí ochlazování lze dosáhnout 95 % z maximálně možné hodnoty R_m .



Obr. 7 . C křivky pro čtyři slitiny [14]

2.4.5 Tvářené slitiny pro nízkoteplotní aplikace

Nejčastěji používané tvářené slitiny hliníku pro nízkoteplotní aplikace jsou slitiny EN AW-1100, 2014, 2024, 2219, 3003, 5083, 5456, 6061, 6063, 7005, 7039 a 7075 [13]. Každá z těchto slitin je zde stručně popsána. Typické vlastnosti za nízkých

teplot jsou pro některé z těchto vybraných slitin hliníku uvedeny v tabulce 7 (v Přílohách).

Slitina hliníku 1100 ve stavu O (žhánáno) a ve stavu H (deformačně zpevněno) má relativně malou pevnost při pokojové teplotě a teplotách pod bodem mrazu. U svařovaných součástí si jak základní materiál, tak i svarový kov udrží dostatečnou tažnost za velmi nízkých teplot. Hliníková slitina 1100 se v oblasti kryogeniky používá na komponenty, které nejsou vystaveny kritickým parametrům.

Slitina hliníku 2014. Podle hodnot uvedených v tabulce 7, slitina hliníku 2014-T6 má relativně vysokou pevnost při pokojové teplotě a rovněž i při teplotě pod bodem mrazu. Udrží si přibližně stejnou tažnost a vrubovou houževnatost při teplotě kapalného vodíku jak i při pokojové teplotě. Pevnost a tažnost svarového kovu jsou však podstatně nižší než pevnost a tažnost základního materiálu. V praxi se někdy z toho důvodu v místech svarů použije větší tloušťka materiálu v porovnání se zbývajícím tloušťkou výrobku. Díky tomuto konstrukčnímu provedení má výrobek požadovanou vysokou pevnost a tuhost společně s minimální hmotností.

Slitina hliníku 2024 má relativně vysokou pevnost jak při pokojové tak i při teplotě pod bodem mrazu ve stavu T3, T4 a T8. Vlastnosti svarových spojů u této slitiny provedené tavným svařováním jsou však méně vyhovující než u slitiny 2014. Slitina 2024 je používána převážně pro konstrukce v letectví a kosmonautice a pro její spojování se používá mechanických upevňovacích prvků.

Slitina hliníku 2090. Kryogenní vlastnosti konstrukčních materiálů s nízkou měrnou hmotností nabývají na stále větším významu z důvodu jejich současného a potenciálního využití při výstavbě kosmických lodí. Například navrhované nadzvukové a trans-atmosférické dopravní prostředky budou používat kryogenní paliva jako je např. kapalný vodík. Poněvadž nádrže na tento druh paliva budou vyráběny z konstrukčních hliníkových slitin, aplikace tohoto druhu urychlily zájem o kryogenní vlastnosti vysoce pevných hliníko-lithiových slitin jako je 2090 (Al-2.7Cu-2.2Li-0.12Zr).

Nejpozoruhodnější vlastností slitiny 2090 ve stavu T81 za nízkých teplot je, že mez kluzu, mez pevnosti, tažnost a lomová houževnatost v podélném i příčném směru se zvyšuje, když teplota klesá. Ačkoli některé další hliníkové slitiny, včetně 2219-T87, vykazují stejné chování, slitina 2090-T81 vykazuje podstatné vylepšení mechanických vlastností.

Slitina hliníku 2219. Tato slitina má o něco nižší pevnost než 2014-T6, ale zato lepší houževnatost při pokojové teplotě a teplotách pod bodem mrazu. Slitina 2219 byla

původně vyvinuta pro konstrukce vyžadující vyšší pevnost za zvýšených teplot. Avšak z důvodu její příznivých vlastností za kryogenních teplot byla slitina 2219-T87 použita např. pro výrobu nádrží na kapalný kyslík a kapalný vodík pro raketoplány.

Slitina hliníku 3003 je používána při výrobě pájených výměníků tepla a jiných zařízení v provozech zkapalňování plynů. Lze ji snadno pájet i svařovat. Mezi nejvýznamnější vlastnosti této slitiny patří její jednoduchá výroba společně s přijatelnou tažností a vrubovou houževnatostí při pokojové teplotě a teplotách pod bodem mrazu.

Slitina hliníku 5083. Je nejvíce používanou hliníkovou slitinou pro kryogenní aplikace, vykazuje při ochlazení z pokojové teploty na bod varu dusíku (-195°C) přibližně 40% zvýšení meze pevnosti v tahu a 10% meze kluzu. Tato slitina je tepelně nevytvrditelná; pro maximální houževnatost je používána ve stavu žíhaném (O). Dá se snadno svařovat a mez kluzu svarového kovu je téměř stejná jako základního materiálu. Slitina 5083-O má široká uplatnění při výrobě nádrží pro přepravu zkapalněného zemního plynu.

Slitina hliníku 5456 je další tepelně nevytvrditelná slitina, která se vyznačuje dobrou svařitelností spolu s dobrou tažností a houževnatostí za kryogenních teplot. Je alternativou pro slitinu 5083.

Slitina hliníku 6061 se většinou používá ve stavu T6. Je svařitelná a může se po svařování opět tepelně zpracovat, ačkoli se toto v praxi příliš nedoporučuje, poněvadž se tím značně snižuje tažnost. Jedna z významných oblastí aplikace pro slitinu 6061-T6 je výroba svařovaných těles ložisek čerpadel a motorů používaných při čerpání zkapalněného zemního plynu v distribučních centrech. Čerpadla jsou během provozu ponořena do zkapalněného zemního plynu. Pro výše zmíněné aplikace je důležité, aby se během svařování dosáhlo úplného provaření všech svarových spojů. Slitina 6061 je k dispozici ve všech normalizovaných stavech. Vzorky odebrané ze slitiny ve stavu T6 mají vyšší pevnost a nižší tažnost než ve stavu T4. Pevnosti svařenců tepelně zpracovaných po svaření na stav T6 jsou nižší v porovnání se základním materiálem ve stavu T6.

Slitina hliníku 6063 je nejčastěji používána ve formě výlisků a pro vedení potrubí.

Slitina hliníku 7005. Výlisky z této slitiny mají vyšší pevnost než u 6061, ale stejnou tažnost při stejných teplotách. Pevnosti plechu 7005-T6351 po svaření převyšují pevnosti plechu 6061 tepelně zpracovaného po svaření na stav T6.

Slitina hliníku 7039 byla původně vyvinuta jako pancéřová slitina. Lze ji snadno svařovat obloukovým svařováním v ochranné atmosféře inertního plynu. Pevnostní zkoušky provedené na deskách ze slitiny 7039 ve stavu T6 ukázaly, že daná slitina si udržuje dobrou tažnost a vrubovou houževnatost za kryogenních teplot. Vzorky odebrané ze svarových spojů vykazují rovněž dobrou tažnost a vrubovou houževnatost. Slitina 7039-T6 byla doporučena pro použití na výrobu tlakových nádob pro kryogenní účely.

Slitina hliníku 7075 reprezentuje vysoko-pevnostní slitiny, zařazené do série 7000, které jsou nesvařitelné. Tato slitina se používá převážně v letectví a kosmonautice a má relativně nízkou lomovou houževnatost ve stavu T6. Obvykle nebývá používána v aplikacích spojených s kryogenními teplotami.

Další vysoko-pevnostní slitiny série 7000 (7079 a 7178) byly rovněž vyhodnoceny za teplot pod bodem mrazu, ale nejsou obecně svařitelné a mají relativně nízkou houževnatost za nízkých teplot.

Shrnutí aplikací hliníkových slitin v kryogenice je uvedeno v tabulce 8 v Přílohách.

3. Svařitelnost a technologie svařování hliníku a jeho slitin

3.1 Svařitelnost hliníku a jeho slitin

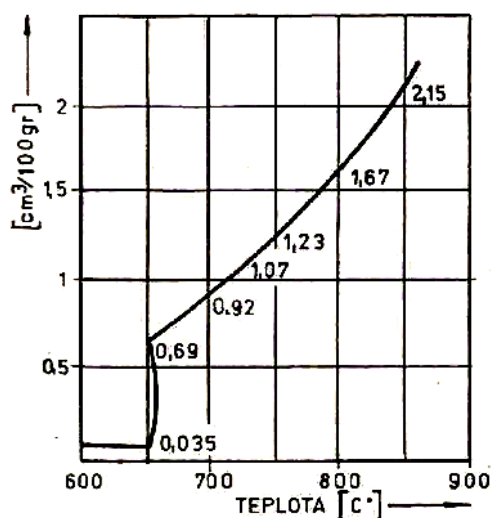
Svařitelnost hliníku a jeho slitin je vzhledem k jejich vlastnostem ovlivňována několika podstatnými činiteli, což si vyžaduje odlišný přístup k svařování v porovnání s ocelovými materiály. Činitelé ovlivňující svařitelnost hliníku a jeho slitin jsou [15]:

- Velká afinita ke kyslíku má za následek tvorbu oxidové vrstvy Al_2O_3 s vysokou teplotou bodu tavení asi 2050 °C a s vyšší měrnou hmotností, než je měrná hmotnost základního materiálu. Oxid zabráňuje metalickému spojení základního a přídavného materiálu a je zapotřebí ho během svařování odstraňovat. Oxidová vrstva se odstraňuje pomocí vhodných tavidel, které ji rozpouštějí, mechanickou cestou – kartáčováním, broušením, trískovým obráběním anebo volbou takové technologie svařování, při které se účinkem fyzikálních jevů během svařování odstraňuje. Tuto úpravu povrchu svařovaných materiálů je zapotřebí provést bezprostředně před svařováním. Čas přestávky mezi úpravou povrchu svaru a svařováním nemá být delší než 3 hodiny.
- Velký koeficient lineární roztažnosti způsobuje velké deformace a napětí, které jsou někdy příčinou vzniku trhlin během svařování. Z tohoto hlediska je zapotřebí zvolit takovou technologii svařování, při které se nejméně tepelně ovlivňuje materiál.
- Citlivost některých slitin hliníku na ohřev, který vyvolává precipitační procesy v tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu, má za následek pokles hodnot mechanických vlastností a snížení odolnosti proti korozi.
- Rozdílné mechanické vlastnosti hliníku a jeho slitin v litém a tvářeném stavu ztěžují zhotovení spoje, který se svými vlastnostmi přibližuje základnímu materiálu. To se týče zejména materiálů tvářených za studena.
- Velká rozpustnost plynů v hliníku způsobuje někdy těžkosti při zhotovení bezpórovitého svaru.
- Hliník během ohřevu nemění barvu, což ztěžuje vizuální určení teploty bodu tavení.
- Hliník díky tomu, že je nemagnetický, nevychyluje elektrický oblouk při obloukovém svařování a nehrozí tedy tzv. foukání oblouku, známé ze svařování uhlíkové oceli.

Pórovitost svarů a její příčiny

Vznik pórů při svařování hliníku je spojen s pohlčováním plynů hliníkem. Jedná se o adsorpci, difúzi a rozpouštění plynů na povrchu i uvnitř kapalného, případně tuhého kovu. Vylučování plynu je opakem tohoto procesu.

Z plynů se připisuje největší význam a vliv na tvorbu pórů vodíku, který je v hliníku rozpustný. Rozpustnost vodíku klesá s rostoucím obsahem nečistot a zmenšuje se u hliníkových slitin v pořadí: Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Ni, Al-Si. Rozpustnost se mění v závislosti od teploty, jak to znázorňuje obr.8.



Obr. 8 Rozpustnost vodíku v hliníku v závislosti na teplotě [15]

Zdrojem vodíku při svařování může být vlhkost na povrchu základního i přídavného materiálu, vlhkost tavidla, případně vlhkost plynů používaných na ochranu svarové lázně.

Vodík může být zadržován na povrchu základního a přídavného materiálu fyzikální adsorpcí, která klesá se stoupající teplotou. Mírným předehřevem je možné tento jev vyloučit.

Vodík je pohlčován svarovým kovem a difunduje do něho v celém objemu. Při ochlazování svarového kovu se rozpustnost vodíku zmenšuje. Poněvadž rychlost chladnutí je u hliníku v důsledku jeho dobré tepelné vodivosti velká, nestačí se všechny vodík vyloučit z kapalného kovu a zůstává v něm uzavřen. Způsoby svařování, které umožňují delší čas setrvání na vyšší teplotě, dávají větší možnost odplynění svarové lázně, a tím zaručují menší pórovitost svaru.

Způsoby svařování v ochraně neutrálních plynů jak netavicí se, tak tavicí se elektrodou se ve vztahu k tvorbě pórů zásadně liší. Při svařování netavicí se elektrodou

stačí splnit požadavek čistoty svarových ploch na povrchu přídavného materiálu, aby se docílily svary dobré kvality. Při svařování tavicí se elektrodou vznikají často póry i při dodržení přísných požadavků na čistotu. Tento rozdíl ve výskytu pórů je možné vysvětlit tím, že proces netavicí se elektrodou dává větší možnost odplynění svarové lázně. Ani podmínky naplynění nejsou tak příznivé, protože svarový kov je přehříván pouze málo nad teplotu likvidu. Při svařování tavicí se elektrodou je svarový kov přenášen obloukem ve formě malých kapek, které jsou vysoce přehřáté, a rozpustnost vodíku při těchto teplotách je velmi velká. Přehřátý kov přenášený obloukem dopadne na poměrně studený svařovaný materiál, v zápětí „mrzne“, a možnost odplynění svarového kovu je malá. Charakteristickým místem výskytu pórů při svařování tavicí se elektrodou jsou místa největšího odvodu tepla, tj. na rozhraní svar-základní materiál.

Vznik trhlin při svařování slitin hliníku

Jednou z hlavních příčin tvorby trhlin jsou objemové změny během krystalizace. Tento jev je jedním z nejnepříznivějších jevů při svařování. Vzhledem k tomu, že některé slitiny hliníku jsou náchylné k tvorbě trhlin, je zapotřebí věnovat této otázce pozornost. Poznání vzniku trhlin umožňuje v mnohých případech jejich odstranění.

Náchylnost slitin hliníku je jedním z kritérií při vyhodnocování jejich svařitelnosti. Při svařování slitin hliníku se setkáváme s dvěma druhy trhlin, a to: trhliny za tepla, vznikající v procesu krystalizace, trhliny za studena, vznikající pod solidem.

Trhliny za tepla

Trhliny za tepla jsou příznačné pro svarový kov a zónu částečného tavení. Jednou z hlavních příčin tvorby trhlin za tepla jsou objemové změny v procesu krystalizace, jejichž výsledkem jsou tahová napětí. Možnost vzniku trhlin je u hliníku daná navíc tím, že koeficient objemové roztažnosti na rozhraní tuhé a kapalné fáze se se snižující se teplotou rychle mění. Když je interval krystalizace velký a zahrnuje v sobě kritickou teplotu změny roztažnosti, svarový kov není schopen odolávat smrštění a vznikají trhliny.

Většina studií zabývajících se vznikem trhlin za tepla se shoduje v tom, že tyto trhliny vznikají v intervalu chladnutí slitiny při existenci tuhé a kapalné fáze, tj. nad solidem.

Slitiny, které se chemickým složením blíží k čistým kovům a rovněž slitiny s chemickým složením blízkým eutektickému složení, budou zpravidla méně náchylné ke tvorbě trhlin. U slitin s vyšším obsahem legujícího prvku v důsledku zvýšeného množství lehce tavitelného eutektika se oddaluje začátek srůstu – přímého styku dendritů a tím se také zmenšuje interval „efektivní krystalizace“, což má za následek snížení sklonu k trhlinám.

Dle výše uvedeného je sklon k trhlinám možno omezit zvýšením množství lehce tavitelného eutektika, tj. použitím přídatných materiálů s vyšším obsahem legujícího prvku.

Sklon k trhlinám je možno ovlivnit rovněž tzv. modifikací svarového kovu. Běžnými modifikátory jsou např. Ti, Zr, Nb atd. U modifikátoru Ti intermetalická fáze $TiAl_3$ tuhne o několik stupňů nad teplotu bodu tuhnutí hliníku. Tím se vytvářejí zárodky během tuhnutí, což má za následek zjemnění zrna a zjemnění zrna zase omezení sklonu k trhlinám.

Trhliny za studena

Trhliny za studena vznikají obvykle v oblasti tepelného ovlivnění během chladnutí materiálu. Výskyt trhlin pod solidem je u slitin hliníku je málo častý. Trhliny se vyskytují zejména u vysokolegovaných slitin typu Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mg-Si, Al-Zn-Mg při tuhém upnutí, tj. na konstrukčních uzlech s malou možností deformace. Trhliny vznikají v rozmezí teplot 200 až 400°C a v podélném směru svaru.

Strukturní poměry svarového spoje hliníku

U tavného svařování rozeznáváme dvě základní oblasti, které charakterizují vlastnosti svarového spoje:

1. Svarový kov (SK)
2. Tepelně ovlivněná oblast (TOO)

1. Struktura svarového kovu

Struktura a vlastnosti SK jsou určované primární krystalizací, která probíhá od roztavení kovu po následující, poměrně rychlé ochlazení.

Roztavená lázeň kovu, která vznikne působením zdroje tepla, je ohraničena základním materiálem (ZM). Mezi SK a základním materiálem, resp. TOO, je tzv. zóna částečného tavení, kterou někdy nazýváme také oblastí společné krystalizace anebo

přechodovou zónou. Tato oblast má velký význam při formování struktury SK, a to proto, že krystalizace začíná na povrchu částečně natavených zrn. U většiny způsobů svařování tuhne roztavený kov postupně tak, že růst dendritů postupuje vlnovitě na povrchu předcházejících ztuhlých dendritů. Charakter krystalizace SK se dá do určité míry ovlivnit, čímž se rovněž mění vlastnosti SK. Struktura SK je dána krystalizací, kterou je možno usměrnit:

- tvorbou určitého množství krystalizačních zárodků,
- rychlostí růstu zárodků, tj. aktivací embryí.

Čím více krystalizačních zárodků je na začátku krystalizace, tím bude struktura SK jemnozrnnější. Charakter struktury ZM má proto velký vliv na konečnou strukturu SK. Hrubozrnná anebo jemnozrnná struktura ZM určuje velikost zrna vznikající primární krystalizace. V každém případě při svařování usilujeme o získání jemnozrnné struktury SK. Kromě dobrých mechanických vlastností u jemnozrnné struktury je menší náchylnost ke vzniku teplotních trhlin.

Zjemnění zrna SK je možno docílit několika způsoby. Jednou z možností, která se v praxi uplatňuje nejčastěji, je tzv. modifikace SK, tj. legování SK takovými přísadami, které tvoří lehko tavitelné fáze eutektického typu anebo disperzní těžko tavitelné fáze. Vhodnými modifikátory jsou Ti, Zr, Nb, Ta, které již v malém množství zjemňují strukturu SK.

Charakteristickým znakem svařovacího procesu je rychlé chladnutí SK. V důsledku rychlého chladnutí dochází během tuhnutí k nerovnovážnému stavu krystalizace. Rovnovážný stav při krystalizaci probíhá tehdy, když jsou splněny podmínky pro difúzi. Rychlé chladnutí, jaké nastává při svařování, zabraňuje difúzním procesům, případně je zpomaluje, což je příčinou vzniku nerovnovážného stavu a dává podmínky ke vzniku nerovnovážných fází, tj. takových fází, které by se neobjevily při pomalém chladnutí.

Strukturu SK, a tím i jeho vlastnosti, bude ovlivňovat i typ spoje, a to tak, že u různých typů spojů nastává různé promísení SK se ZM. K největšímu promísení dochází u tupých spojů, a to v rozmezí 60 až 80 %, u V-spojů v závislosti od tloušťky do 50 %, u koutových svarů asi 30 %.

2. Struktura tepelně ovlivněné oblasti

V TOO budou probíhat strukturní změny v tuhém stavu. Do jaké míry proběhnou tyto změny, bude záležet na chemickém složení materiálu, na jeho stavu, na teplotě na kterou byl materiál vyhřátý a rovněž i na rychlosti ochlazování. Teplotu a rychlost ochlazování bude rovněž ovlivňovat technologie svařování.

Proces krystalizace v TOO u tvářeného materiálu závisí na stavu materiálu (procento studené deformace). Poněvadž při svařování je rychlost ochlazování velká, proběhne proces rekrystalizace v jednotlivých místech TOO v závislosti na teplotě. Teplota materiálu v blízkosti svaru dosáhne teplotu blízké solidu a postupně se bude od tohoto místa snižovat. V blízkosti svaru budou taková místa, kde rekrystalizace proběhne úplně. V určité oblasti proběhne proces zotavení, tj. pouze částečný návrat deformované mřížky do rovnovážného stavu. Zhrubnutí zrna (sekundární krystalizace) nastává tehdy, když se materiál ponechá delší dobu na vyšší teplotě. Oblast krystalizace je charakterizována poklesem pevnosti a zvýšením tažnosti materiálu.

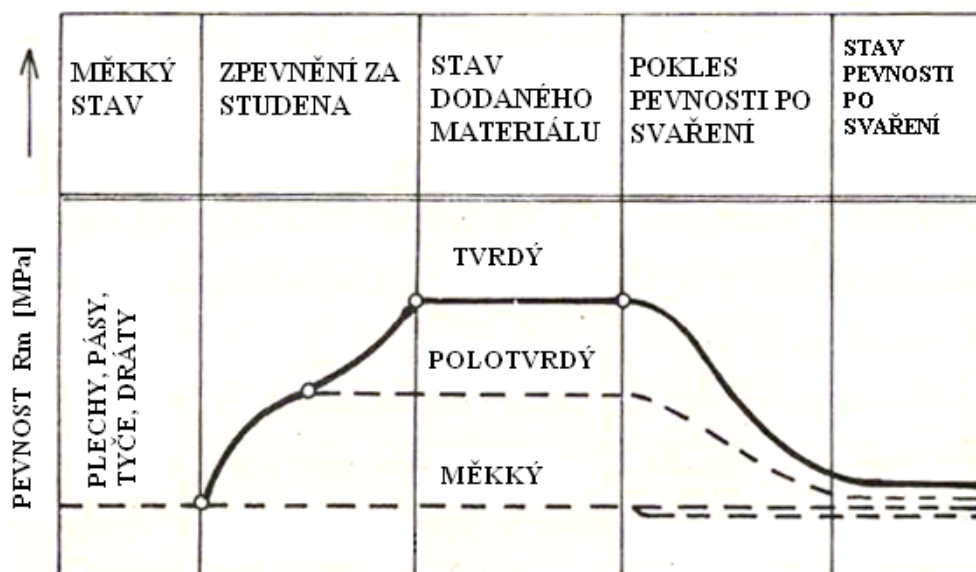
V materiálech, které se vyznačují překrystalizací v tuhém stavu (materiály po tepelném zpracování), nastávají změny výsledné struktury tím, že se objevují doplňkové fáze anebo se mění jejich množství.

Slitiny hliníku tohoto typu, u kterých nastane v TOO podstatná změna struktury, doprovázené značným poklesem hodnot mechanických vlastností jsou z hlediska svařování charakterizovány jako obtížně svařitelné. Jejich výchozí stav je dán tepelným zpracováním a je možno ho označit za nerovnovážný. TOO se u těchto slitin bude vyznačovat dvěma pásmy s rozdílnými vlastnostmi, které závisí na teplotě, na kterou byl materiál zahřátý. Oblast v blízkosti svaru, kde teplota překročila čáru maximální rozpustnosti, se bude vyznačovat relativně silným poklesem hodnot mechanických vlastností. V této oblasti vznikl během rychlého ochlazení přesycený tuhý roztok. Po určitém časovém odstupu u samokalitných slitin proběhne v této oblasti proces vytvrzování, což se projeví zvýšením tvrdosti a pevnosti.

Druhá oblast TOO, která byla vyhřátá na teplotu pod čáru maximální rozpustnosti, se bude vyznačovat trvalým poklesem pevnosti. V této oblasti v závislosti na tepelném cyklu nastává u vytvrditelných slitin částečný anebo úplný návrat do rovnovážného stavu, tj. vyloučí se rovnovážné fáze. Od této oblasti směrem k ZM se bude pevnost postupně blížit k hodnotám pevnosti ZM.

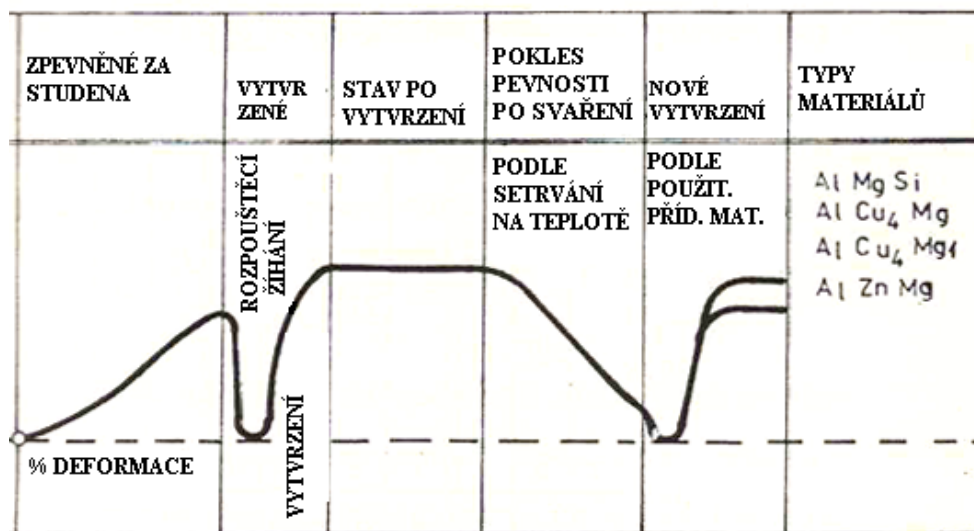
Příčina ztráty mechanických vlastností při svařování vytvrditelných slitin je úzce spojená s vyloučením rovnovážného precipitátu u jednotlivých vytvrditelných slitin.

Změna pevnosti tvářených materiálů – nekalitelných po svaření, je schématicky znázorněná na obr. 9. Diagram ukazuje změnu pevnosti materiálů po válcování za studena. Měkký stav odpovídá přibližně materiálu v litém stavu.



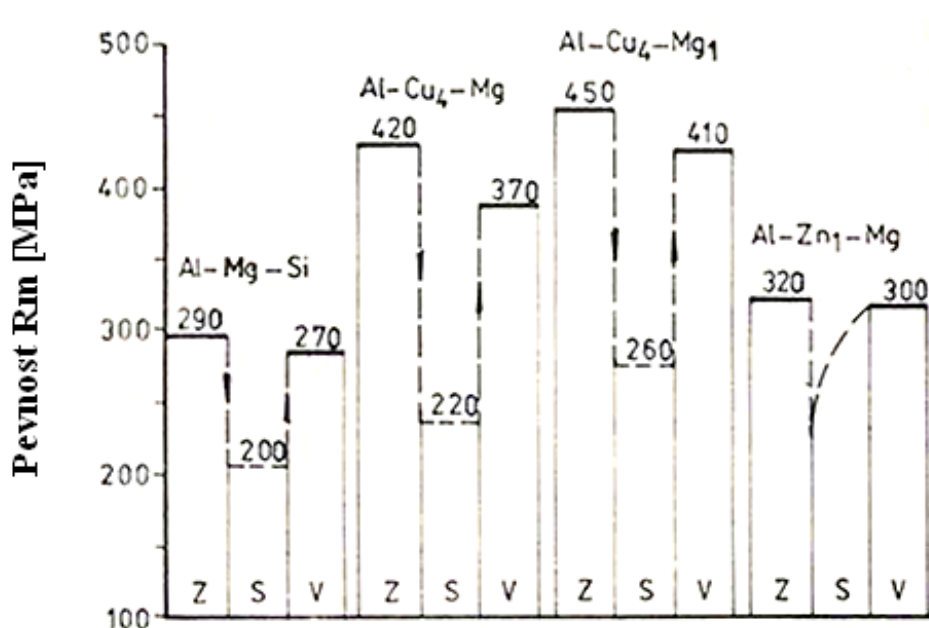
Obr. 9. Změna pevnosti tvářených slitin [15]

Obr. 10 znázorňuje změnu pevnosti při svařování vytvrditelných materiálů. Z průběhu je vidět, že pokles pevnosti je poměrně velký. Novým tepelným zpracováním se dá docílit zvýšení pevnosti, jehož míra závisí podle použitého přídavného materiálu.



Obr. 10 Změna pevnosti vytvrditelných slitin po svaření a případném novém tepelném zpracování [15]

Pokles pevnosti a hodnoty spojů po tepelném zpracování jsou znázorněné na obr. 11. U slitiny Al-Zn-Mg se efektu samovytvrzení dosáhne asi po třech měsících.



Obr. 11 Změna pevnosti vytvrditelných hliníkových slitin po svaření a novém vytvrzení
Z – základní materiál; S – spoj; V – spoj po vytvrzení [15]

3.2 Technologie svařování hliníku a jeho slitin

Metody svařování

Hliník a jeho slitiny lze svařovat vícero metodami. V této diplomové práci se popis zužuje na dvě nejrozšířenější metody svařování hliníku a jeho slitin:

1. 141 - obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (WIG, TIG)

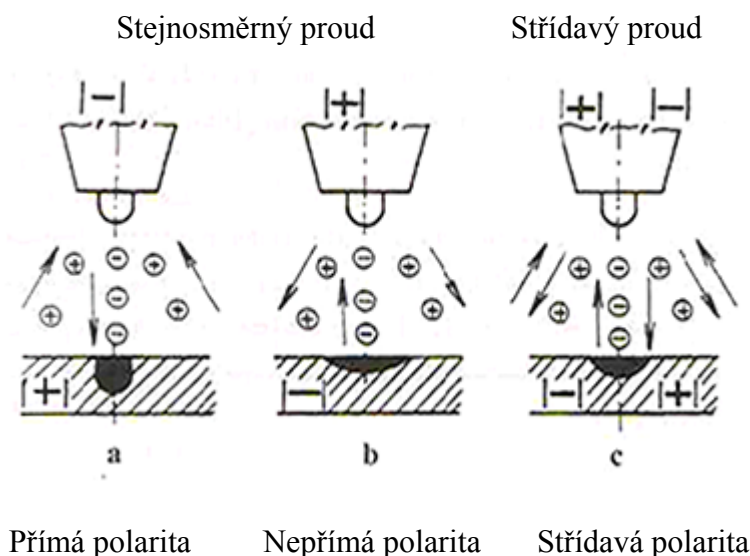
Při svařování touto metodou oblouk hoří mezi netavicí se wolframovou elektrodou, která je chráněná inertním plynem. Úlohou plynu je chránit roztavený kov a elektrodu před vzdušnou atmosférou. Při vhodném zapojení má ionizovaný plyn čistící účinek na povrch základního materiálu. Během svařování se odstraňují těžko tavitelné oxidy. Při svařování není potřeba používat tavivo, což je jedna z hlavních předností tohoto způsobu svařování.

Oblouk v ochranné atmosféře argonu má dvě koncentrační zóny, a to centrální – plazma a okolní, venkovní, tzv. rekombinační zónu, ve které nastává neutralizace

kladných iontů. V oblasti plazmy nastává převážně tepelná ionizace částecek plynu. Tok proudu je vyvolán pohybem elektronů.

Rozeznáváme:

- a) svařování stejnosměrným proudem na přímé polaritě (viz obr. 12a)
- b) svařování stejnosměrným proudem na nepřímé polaritě (viz obr. 12b)
- c) svařování střídavým proudem (viz obr. 12c)



Obr. 12 Vliv polarity na formu a rozměry svaru [16]

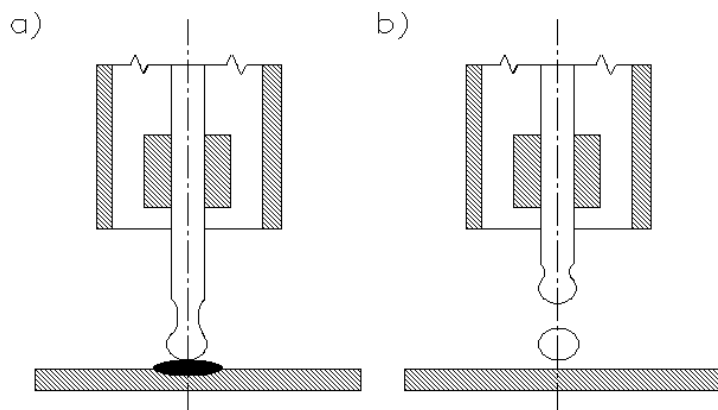
Z průběhu střídavého proudu vyplývá, že v každé půlperiodě je elektroda jednou katodou a jednou anodou. K čištění povrchu svařovaného materiálu dochází pouze tehdy, když je netavící se elektroda anodou, tedy pouze během kladné půlvlny (půlperiody) střídavého proudu. Tohoto čistícího účinku se výhodně používá při svařování materiálů, vytvářejících na svém povrchu vrstvu vysokotavitelných oxidů což mj. platí pro hliník a jeho slitiny. Proto se při svařování WIG těchto materiálů používá střídavý proud.

2. 131 - obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu (MIG)

Při svařování tavící se elektrodou oblouk hoří mezi tavící se kovovou elektrodou a materiálem, přičemž svarová lázeň je chráněná inertním plynem.

Jedná se o velice efektivní metodu vhodnou také pro automatizované svařování. Elektrodou je zde holý drát navinutý na cívce, který je kladkovým podavačem, konstantní rychlostí přes napájecí průvlak umístěný uvnitř ochranné hubice na konci hořáku, podáván do svarové lázně. Drát je současně přídavným materiálem. Napájecí

průvlek je připojen na kladný pól zdroje stejnosměrného svářečního proudu. Katodu stejně jako u sváření obalenou elektrodou tvoří základní materiál. Hubicí hořáku je k místu svaru přiváděn ochranný plyn. Z hlediska přenosu přídavného materiálu do svarové lázně rozeznáváme dva druhy procesů (viz obr. 13.)



Obr. 13. a) zkratový proces, b) bezzkratový (sprchový) proces [17].

a) Zkratový proces - tvořící se kapka vytváří vodivý můstek mezi elektrodou a tavnou lázní a tak vzniká zkrat ve svařovacím obvodu. Špičkový zkratový proud zvýší teplotu vodivého můstku a urychlí odtavení kapky. Frekvence odtavování je asi 200 - 300 kapek za sekundu. Tento proces klade vysoké nároky na dynamické vlastnosti zdroje svářečního proudu. Používá se při svařování tenkých plechů a při sváření větších tloušťek v montážních polohách, kdy se svařuje menšími proudy.

b) Bezzkratový proces - při tomto procesu je průměr kapky vždy menší než vzdálenost elektrody a tavné lázně. Tento proces vzniká při vyšším proudovém zatížení elektrody. V praxi se používá pro svařování větších tloušťek materiálů v poloze vodorovné shora.

Přídavné materiály pro metodu MIG se dodávají ve formě drátů o průměru 0.8 - 2.4 mm navinutých na cívkách. Dráty mají speciální povrchovou úpravu zvyšující tvrdost povrchu. Tím je zajištěno spolehlivé podávání pomocí kladek. Vysoké požadavky jsou kladeny na přesné dodržení hodnoty průměru drátu, aby byl drát spolehlivě napájen po celé délce napájecího průvleku.

Používaná zařízení pro svařování hliníku metodou MIG se v zásadě neliší od zařízení pro sváření ocelí. Zvýšenou pozornost je třeba věnovat podávání drátu, protože hliník je velmi měkký, což může být zdrojem problémů. Používají se teflonové bowdeny pro vedení drátu v hořáku. Maximální délka hořáku by při klasickém tlačném

podávání měla být asi 3 m. Podávací kladky nesmí deformovat drát, jinak vznikají problémy s napájením drátu v průvlaku. Používají se tedy kladky s profilem drážky ve tvaru půlkruhu. Výhodné je použití čtyřkladkového podavače, který disponuje větší adhezí při nižším nutném přitlaku. Doporučuje se použití průvlaků s většími otvory kvůli velké tepelné roztažnosti hliníku.

V poslední době se začíná prosazovat tzv. pulzní MIG svařování. Je vhodné pro svaření v nucených polohách a v případech, kdy je kladen důraz na estetické provedení svarové housenky. Konstantní stejnosměrný proud je při této metodě nahrazen sérií pulsů s definovanou střední hodnotou proudu. Výsledkem je tzv. penízkový svar.

Doporučení pro obloukové svařování hliníku a jeho slitin

Doporučení pro obloukové svařování hliníku a slitin hliníku je podrobně popsáno v ČSN EN 1011-4 [18] a níže jsou uvedeny hlavní body platné pro obě výše uvedené metody svařování.

Přídavný materiál

Přídavný materiál musí odpovídat základnímu materiálu, viz doporučení pro volbu svařovacích materiálů uvedené v ČSN EN 1011-4 v příloze B.

Ochranné a formovací plyny [18]

Při svařování hliníku může mít volba ochranného plynu podstatný vliv na produktivitu a jakost zhotoveného spoje.

Vzhledem k citlivosti hliníku na oxidaci musí být použity inertní plyny, jako argon a helium. Přestože je argon nejvíce používaným ochranným plynem, použití helia nebo směsi argonu a helia může mít své výhody. (Použití čistého helia je omezeno pouze na svařování metodou WIG stejnosměrným proudem).

Mezi výhody se může zařadit:

- lepší průvar a tvar housenky,
- zvýšenou rychlost svařování,
- svařování většího rozsahu tlouštěk,
- snížení teploty přehřevu,
- snížený výskyt vad, např. pórovitosti.

Se zvyšujícím se obsahem helia ve směsi se profil závaru mění z úzkého prstovitého na oválnější. Je zřetelné také zmenšení převýšení svaru a větší hloubka závaru.

Při libovolné tloušťce materiálu lze přidáním helia k argonu dosáhnout zvýšené rychlosti svařování, a to z toho důvodu, že helium vykazuje účinnější přenos tepla z elektrického oblouku než argon. Zvýšení rychlosti svařování může také vést ke zmenšení velikosti TOO.

Vyšší tepelný příkon, který souvisí se směsmi plynu bohatými na helium, také umožňuje svařování spojů větších tloušťek. Avšak směsi plynů s vysokým obsahem helia se běžně nedoporučují pro materiály s tloušťkou menší než 3 mm, mimo případů využití automatických aplikací.

Dodatečné teplo, které vzniká při použití směsi obsahujících helium, může také snížit výskyt vad, jako je pórovitost a studené spoje.

Příprava svarových ploch

Všeobecnou směrnicí pro přípravu spojů je ČSN EN ISO 9692-3 [19]. Úprava svarových ploch musí být vhodná pro danou metodu svařování.

Polohy svařování

Polohy svařování, kterým je dáвана přednost podle ČSN EN ISO 6947 [20], jsou PA, PB, PC, PF.

Přehřev

Přehřev se používá z následujících důvodů:

- pro odstranění vlhkosti před svařováním, např. při svařování na montáži,
- pro zabránění vzniku vad souvisejících se studenými starty,
- pro dosažení tepelné rovnováhy při svařování dílů značně odlišných tloušťek,
- pro zmenšení vlivu nadměrného ochlazování při svařování dílů velké tloušťky.

Teploty přehřevu jsou uvedeny v tabulce 9 (v Přílohách). Nadměrná teplota přehřevu nad hodnoty uvedené v tabulce 9 ovlivní mechanické vlastnosti mechanicky zpevněných nebo plně tepelně zpracovaných materiálů (tzn., dojde k částečnému žíhání nebo stárnutí). Také může dojít ke změně metalurgické struktury TOO způsobené růstem zrna a/nebo precipitací sekundárních fází.

V určitých případech může použití směsi argon-helium nebo helia místo argonu vyloučit potřebu přehřevu.

Teplota interpass

Teplota interpass se kontroluje z následujících důvodů:

- pro zabránění snížení mechanických vlastností přehřátím,
- pro zmenšení šířky změkčené oblasti TOO
- snížení míry segregace v TOO, např. nadměrným stárnutím.

Doporučuje se, aby teplota spoje před zahájením svařování následující svarové housenky nepřekročila příslušnou hodnotu uvedenou v tabulce 9.

4. Návrh a realizace modelového spoje ke kvalifikaci technologického postupu svařování hliníkové slitiny

4.1 Výběr základního materiálu

Kritériem pro volbu základního materiálu hliníkové slitiny při návrhu a realizaci modelového spoje, bylo její praktické využití v kryogenních aplikacích. Dalším aspektem bylo, aby kvalifikace proběhla na takové slitině, která pokryje co nejširší rozsah stejnorodých či různorodých materiálů. Dle tabulky 4 normy ČSN EN ISO 15614-2 [21] byla zvolena skupina materiálu zkušebního kusu 23.1. Do této skupiny materiálů patří dle TNI CEN ISO/TR 15608 [22] slitiny hliníku, hořčíku a křemíku. Jedná se o tepelně vytvrditelné slitiny. Pro modelový spoj byl vybrán materiál s označením EN AW-6063 T66 [AlMgSi] (T66 = po rozpouštěcím žíhání a umělém stárnutí, mechanické vlastnosti vyšší než u T6 speciálním zpracováním).

Dle tabulky 8 normy ČSN EN ISO 15614-2 byl vybrán tupý spoj na trubce, svařovaný z jedné strany, bez podložení. Tento druh spoje má nejširší rozsah kvalifikace. Použitý rozměr trubky $\varnothing 80 \times 12$ mm. Tloušťka stěny zkušebního kusu byla zvolena 12 mm, aby bylo možno po svaření provést mj. zkoušku vrubové houževnatosti. Při poptávání základního materiálu trubky $\varnothing 80 \times 12$ mm výše uvedené jakosti nebyl nikdo z dodavatelů schopen zajistit dodání pouze omezeného množství 1÷2 m. Všichni nabízeli odběr materiálu nad 1000 kg. Z toho důvodu bylo přistoupeno k výrobě trubky požadovaných rozměrů soustružením vnitřního průměru z tyče $\varnothing 80$ mm.

Rozsah kvalifikace pro tloušťku základního materiálu plechů a trubek, když tloušťka zkušebního kusu je 12 mm, je dle tabulky 5 výše uvedené normy následující:
3 až 24 mm.

Rozsah kvalifikace pro průměr trubek a přípojů odbočky, když průměr zkušebního kusu je 80 mm, je dle tabulky 7 výše uvedené normy následující:
 ≥ 40 mm.

4.1.1 Chemické složení a mechanické vlastnosti hliníkové slitiny EN AW-6063 T66 [AlMgSi]

Chemické složení a mechanické vlastnosti hliníkové slitiny EN AW-6063 T66 [AlMgSi] je uvedeno v tabulce 10 v Přílohách. Hodnoty jsou převzaty z inspekčního certifikátu 3.1 č. 10 212 dodaného s materiálem od výrobce Sapa Profily a.s.

4.2 Výběr přídavného materiálu

V normě ČSN EN 1011-4 v příloze B je uvedeno doporučení pro volbu svařovacích materiálů. Tabulka B.1 v téže normě uvádí systém rozdělení přídavných materiálů do skupin a tabulka B.2 uvádí doporučení pro volbu přídavných materiálů pro svarové spoje podobných a odlišných základních kovových slitin, při pracovních teplotách do +50°C.

U uvedeného modelového spoje je doporučeno volit přídavné materiály skupiny 4 a 5. Skupina 4 jsou přídavné materiály typu Al-Si. Skupina 5 jsou přídavné materiály typu Al-Mg.

V tabulce 4 normy ČSN EN ISO 15614-2 je u skupiny 23.1 poznámka „a“ ve které je uvedeno, že rozsah kvalifikace pro spoje stejnorodých a různorodých materiálů platí za předpokladu použití přídavného materiálu typu **Al-Mg**. Tímto se výběr přídavného materiálu zúžil na skupinu 5. V tabulce 11 (v Přílohách) jsou uvedeny přídavné materiály od tří různých výrobců vhodné pro modelový spoj jak pro metodu svařování 141, tak i pro metodu 131. Z této skupiny byl pro svařování modelového spoje metodou 141 vybrán drát s označením OK Tigrod 5183 Ø 3,2 mm od výrobce ESAB Vamberk s.r.o.

4.3 Návrh specifikace postupu svařování p(WPS)

Dle požadavků normy ČSN EN ISO 15614-2 pro stanovení a kvalifikaci postupů svařování a dle doporučení normy ČSN EN 1011-4 pro obloukové svařování hliníku byl vypracován návrh specifikace postupu svařování p(WPS) uvedený v tabulce 12 v Přílohách.

4.4 Záznam průběhu svařování zkušebních kusů

Dle výše uvedené pWPS byly svařeny metodou 141 zkušební kusy č. 1÷3 v poloze PF s použitím svařovacího zdroje TRITON 220 AC/DC fy EWM. Průběh svařování zachycují obr. č. 14÷18. Teplota přehřevu stanovena dle doporučení ČSN EN 1011-4 čl. 17 na max. 120°C. Uskutečněno pomocí propan-butanového ohřevu. V průběhu kladení svarových housenek byla snaha nepřekročit hodnotu 100°C uvedenou jako max. teplotu interpass dle výše uvedené normy čl. 18. Teplota byla měřena dotykovým teploměrem OMEGA HH 11. K formování kořene byl použit ochranný plyn argon 4.6 v množství 4l/min. Pro dosažení plynulé kořenové vrstvy bylo

nutno vybrousit místa napojení a správně odhadnout okamžik dostatečného natavení svarových hran, jinak docházelo k jejich nedostatečnému natavení anebo v opačném případě k nadměrnému převýšení kořene. Svarový úkos byl vyplněn kořenovou vrstvou, dvěma výplněmi a krycí vrstvou, tak jak to je uvedeno v p(WPS).

4.5 Tepelné zpracování

Zkušební kus č. 1 a č. 2 byl podroben precipitačnímu zpevnění – vytvrzování. Princip je popsán v kapitole 2.4.4. U zkušebního kusu č. 3 nebylo aplikováno žádné tepelné zpracování, byl ponechán ve stavu po svaření.

Aplikovaný režim precipitačního zpevnění – vytvrzování zkušebních kusů č. 1 a č. 2:

Rozpouštěcí žíhaní:

- teplota 540°C
- čas na teplotě 20 minut

Kalení: do vody

Vytvrzování, umělé stárnutí:

- teplota 185°C
- čas 8 hodin
- volné ochlazování na vzduchu

Rozpouštěcí žíhaní bylo provedeno v peci RKZ 80 č. 9289-72-17 v centrální mechanické zkušebně Třineckých železáren.

Vytvrzování, umělé stárnutí bylo provedeno v peci VP 125 č. 9289-72-14 se záznamem v centrální mechanické zkušebně TŽ.

5. Kontrola a zkoušení zkušebních kusů

5.1 Rozsah zkoušení

Zkoušení zahrnovalo jak nedestruktivní (NDT), tak destruktivní zkoušení uvedené v ČSN EN ISO 15614-2 v tabulce 1 + zkoušení nad rámec této normy.

5.2 Nedestruktivní zkoušky

5.2.1 Vizualní kontrola

Vizualní kontrola se provádí dle ČSN EN 970 [23]. Kritéria přípustnosti stanovuje ČSN EN ISO 10042 [24], st. jakosti B/C dle ČSN EN ISO 15614-2 čl. 7.5. Vizualní kontrolu všech tří zkušebních kusů provedl p. Filák M., pracovník s č. oprávnění 101-00219 – stupeň VT2 podle požadavků ČSN EN 473 [25]. Výsledek vizualní kontroly s ohledem na kritéria přípustnosti je **vyhovující**. Přepis protokolu vizualní kontroly (viz tabulka 13 v Přílohách).

5.2.2 Radiografická zkouška

Radiografická zkouška se provádí dle ČSN EN 1435 [26]. Kritéria přípustnosti stanovuje ČSN EN ISO 10042 , st. jakosti B/C dle ČSN EN ISO 15614-2, čl. 7.5. Radiografickou zkoušku všech tří zkušebních kusů provedl a vyhodnotil p. Filák M., pracovník s č. oprávnění 101-00219 – stupeň RT3 podle požadavků ČSN EN 473. Výsledek radiografické zkoušky s ohledem na kritéria přípustnosti je **vyhovující**. Přepis protokolu radiografické zkoušky (viz tabulka 14 v Přílohách).

5.2.3 Kapilární zkouška

Kapilární zkouška se provádí dle ČSN EN 571 [27]. Kritéria přípustnosti stanovuje ČSN EN 1289-1 [28]. Kapilární zkoušku všech tří zkušebních kusů provedl a vyhodnotil p. Filák M., pracovník s č. oprávnění 101-00219 – stupeň PT3 podle požadavků ČSN EN 473 a ISO 9712. Výsledek kapilární zkoušky s ohledem na kritéria přípustnosti je **vyhovující**. Přepis protokolu kapilární zkoušky (viz tabulka 15 v Přílohách). Obr. 19 v Přílohách dokumentuje provedení kapilární zkoušky na zkušebním kuse č. 1.

5.3 Destruktivní zkoušky

5.3.1 Příčná zkouška tahem

Příčná zkouška tahem za okolní teploty se provádí dle ČSN EN 895 [29]. ČSN EN 10002-1 [30] specifikuje metodu zkoušení tahem kovových materiálů a definuje mechanické vlastnosti, které mohou být stanoveny za okolní teploty.

Tahová zkouška za snížené teploty se provádí dle ČSN 420313 [31]. Zkouška byla provedena na elektromechanickém trhačím stroji FPZ 100/1 s maximální zátěžnou silou 100 kN. Přístroj je vybaven teplotní komorou, ve které byl umístěn vzorek do mechanických samosvorných čelistí. Atmosféra této komory byla sycena parami tekutého dusíku a její množství dle požadované teploty zkoušení bylo korigováno regulátorem s třemi řídicími K termočlánky ve třech chladících zónách komory. Zápis diagramu byl proveden mechanickým XY zapisovačem s použitým dvacetinásobným zvětšením. Na stroji byl použit rozsah hlavy na max. 20 kN. Trhačí stroj i teplotní komora měli v době zkoušky platné kalibrační osvědčení s návazností na mezinárodní etalony.

Požadavek dle ČSN EN ISO 15614-2 čl. 7.4.2.:

Výsledky meze pevnosti $R_m(w)$ svařovaného zkušebního kusu ve stavu po svařování musí vyhovovat následujícímu požadavku:

$$R_m(w) = R_m(pm) \cdot T \quad [MPa]$$

kde:

$R_m(w)$ je pevnost v tahu svařovaného zkušebního kusu ve stavu po svařování [MPa]

$R_m(pm)$...minimální mez pevnosti v tahu ZM, požadovaná odpovídající normou [MPa]

T součinitel využití spoje [-]

Součinitel využití spoje dle tabulky 2 výše uvedené normy pro skupinu materiálů 23.1, stavu ZM před svařováním T6 a stavu po svařování - umělém stárnutí je stanoven na hodnotu 0,7.

Výpočet požadované meze pevnosti $R_m(w)$:

$$R_m(w) = 245,0,7 \quad [MPa]$$

$$R_m(w) = 171,5 \quad [MPa]$$

Příčná zkouška tahem byla provedena celkem na 5 vzorcích. Výsledky hodnot tahové zkoušky (viz tabulka 16 v Přílohách).

Vzorky č. 1 a č. 8 byly odebrány ze zkušebního kusu č. 3, který nebyl vytvrzen po svaření. Graf tahové zkoušky vzorku č. 1 zkoušeného při okolní teplotě +23°C (viz obr. 20 v Přílohách). Graf tahové zkoušky vzorku č. 8 zkoušeného za snížené teploty -60°C (viz obr. 21 v Přílohách).

Další tři vzorky byly odebrány ze zkušebního kusu č. 2, který byl precipitačně zpevněn - vytvrzen po svaření. Vzorky č. 3 a č. 9 byly zkoušeny při okolní teplotě +23°C. Jejich grafy tahové zkoušky (viz obr. 22 a 23 v Přílohách). Graf tahové zkoušky vzorku č. 4 zkoušeného za snížené teploty -70°C (viz obr. 24 v Přílohách).

Tahová zkouška vzorků při okolní teplotě proběhla ve zkušebně válcoven Třineckých železáren a.s. na zkušebním stroji INOVA 160 kN č. 9298-07-06.

Tahová zkouška vzorků za snížených teplot proběhla v laboratoři mechanických vlastností ve VÚHŽ a.s. Dobrá na zkušebním stroji č. FPZ 100/1.

5.3.1.1 Zhodnocení příčné zkoušky tahem

Srovnání nevytvrzených vzorků č. 1 a č. 8 se ZM a SK

Příčná zkouška tahem prokázala významný vliv svařování na pevnostní vlastnosti vytvrditelné hliníkové slitiny. Pevnost v tahu (při 23°C) vzorku č. 1 se snížila oproti pevnosti základního materiálu o 50,4%, což představuje polovinu původní hodnoty. Pevnost v tahu (při -60°C) vzorku č. 8 se snížila oproti pevnosti základního materiálu o 46%, což v porovnání se vzorkem č. 1 naznačuje, že pevnostní vlastnosti hliníku a jeho slitin se za snižujících se teplot zůstávají stejné anebo vykazují mírné zlepšení. Pokud u vytvrditelné hliníkové slitiny není po svařování aplikováno precipitační zpevnění – vytvrzování, je nutno počítat s výrazným snížením jak meze kluzu, tak i meze pevnosti. Oba dva vzorky byly po vytvoření krčku přetrženy mimo svar (viz obr. 25 v Přílohách).

Hodnota pevnosti v tahu svarového kovu 290 MPa (dle výrobce PM) je vyšší o 13,8% oproti základnímu materiálu a cca o 55% vyšší oproti naměřeným hodnotám tahové zkoušky výše uvedených vzorků po svaření.

Srovnání vytvrzených vzorků č. 3, 9 a 4 se ZM a SK a požadavku normy

Výše uvedené vzorky byly odebrány ze zkušebního kusu č. 2, který byl vytvrzen podle režimu popsaného v kapitole 4.5. Jak je patrné z tabulky č. 15 hodnoty pevnosti v tahu se u těchto vzorků dostaly cca na úroveň pevnosti základního materiálu a u vzorku č. 4 (při -70°C) se pevnost nepatrně zvýšila o 2,8%. U všech tří vzorků došlo k přetržení

v přechodové oblasti svar – základní materiál bez předchozí plastické deformace (viz obr. č. 25 v Přílohách). Obr. č. 26 v Přílohách dokumentuje vzhled lomové plochy vzorku č. 9. V tomto případě příčná zkouška tahem prokázala velký význam precipitačního zpevnění – vytvrzování pro zvýšení meze pevnosti vytvrditelných slitin po svaření, ale odhalila slabá místa svarových spojů v tomto případě v přechodové oblasti svar – základní materiál.

Hodnota pevnosti v tahu svarového kovu 290 MPa (dle výrobce PM) je vyšší o cca 13,4% oproti naměřeným hodnotám při tahové zkoušce výše uvedených vzorků po svaření.

Hodnota meze pevnosti všech tří vytvrzených vzorků je vyšší než vypočtená minimální pevnost v tahu 171,5 Mpa svařovaného zkušebního kusu ve stavu po svařování a to: u vzorku č. 3 o 43,4 %, u vzorku č. 9 o 45 % a u vzorku č. 4 o 49,8 %. Tímto je splněn požadavek normy a výsledek příčné zkoušky tahem je **vyhovující**.

5.3.2 Příčná zkouška lámavosti

Příčná zkouška lámavosti se provádí podle normy ČSN EN 910 [32]. Úhel ohybu musí dosáhnout 180°, s vypočítaným průměrem ohýbacího trnu na základě tažnosti materiálu, následovně při tažnosti > 5%:

$$d = \frac{100 \cdot t_s}{A} - t_s \quad [\text{mm}]$$

d maximální průměr trnu [mm]

t_s tloušťka tyče pro zkoušku lámavosti [mm]

A minimální tažnost požadovaná materiálovou specifikací výrobce [%]

Výpočet průměru ohýbacího trnu

$$d = \frac{100 \cdot 12}{10} - 12 \quad [\text{mm}]$$

$$d = 108 \quad [\text{mm}]$$

Pro provedení zkoušek musí být hodnoty průměru trnu zaokrouhleny směrem dolů.

Pro zkoušení byl použit trn ø 105 mm.

Příčné zkoušce lámavosti byly podrobeny celkem 4 vzorky. Vzorky č. 10A, 10B byly odebrané ze zkušební kusu č. 3, který nebyl vytvrzen po svaření. Vzorek 10A byl tažen z lící strany, vzorek 10B ze strany kořene. Vzorky č. 10C, 10D byly odebrané ze zkušební kusu č. 2, který byl vytvrzen po svaření. Vzorek 10C byl tažen

z lící strany, vzorek 10D ze strany kořene. Zkoušení proběhlo v Centrální mechanické zkušebně Třineckých železáren a.s.

Po ohnutí byl přezkoušen jak vnější povrch, tak i boční strany zkušební tyče. Během zkoušení se na tyčích neobjevila žádná jednotlivá vada, v jakémkoliv směru větší než 3 mm, jak je požadováno dle normy ČSN EN 15614-2. Přepis protokolu příčné zkoušky lámavosti (viz tabulka 17 v Přílohách). Stav všech vzorků po zkoušce dokumentuje obr. 27 v Přílohách.

5.3.3 Makroskopická a mikroskopická kontrola svarových spojů

Zkušební vzorky byly připraveny a kontrolovány podle normy ČSN EN 1321 [33]. Kritéria přípustnosti stanovuje ČSN EN ISO 10042, st. jakosti B/C dle ČSN EN ISO 15614-2, čl. 7.5. Kontrola byla provedena na 2 vzorcích, orientovaných příčně k ose svaru, které zahrnovaly neovlivněný základní materiál, svarový kov a tepelně ovlivněnou oblast na obou stranách svaru. Povrch těchto vzorků byl nejdříve srovnán na frézce a pak na nich bylo aplikováno postupné broušení studovaného povrchu na SiC metalografických papírech o hrubosti 120 – 1200 s použitím vody jako chladicího média. Poté se vzorky dvakrát leštily pomocí diamantové suspenze fy Struers. Pak následovalo naleptání vzorků leptadlem Adler matting (směs CuCl_2 , FeCl_3 , H_2O , HCl) po dobu 20s. Po naleptání byly zkušební vzorky opláchnuty tekoucí vodou, následně ponořeny do ethylalkoholu a vysušeny horkým vzduchem.

5.3.3.1 Makroskopická kontrola

Popis a hodnocení vzorku č. 12A:

Vzorek č.12A byl odebrán ze zkušebního kusu č. 3, který nebyl vytvrzen po svaření. Na snímku makrostruktury vzorku č. 12A (viz obr. 28 v Přílohách) lze mj. vyzorovat strukturní nehomogenitu základního materiálu, kde je vidět měnící se velikost zrn v rozmezí průřezu. Dále zde není znatelná TOO, tak jak to bývá u oceli. Snadno rozpoznatelná je linie natavení. Převýšení tupého svaru i kořene je v mezích stupně přípustnosti C dle výše zmiňované normy.

Makroskopická kontrola svaru vzorku č. 12A neprokázala nepřípustné vady a proto je výsledek **vyhovující**.

Popis a hodnocení vzorku č. 12B:

Vzorek č.12B byl odebrán ze zkušebního kusu č. 2, který byl vytvrzen po svaření. Na snímku makrostruktury vzorku č. 12B (viz obr. 29 v Přílohách) lze rovněž vypořizovat strukturní nehomogenitu základního materiálu. Převýšení tupého svaru i kořene je v mezích stupně přípustnosti C dle výše zmiňované normy.

Makroskopická kontrola svaru vzorku č. 12B neprokázala nepřipustné vady a proto je výsledek **vyhovující**.

5.3.3.2 Mikroskopická kontrola

Popis a hodnocení vzorku č. 12A:

Na obr. 30 ÷ 32 v Přílohách jsou snímky mikrostruktury vzorku č. 12A, nevytvrzeného po svařování pořízené ze středu tloušťky materiálu, zvětšeno 100x. Snímky postupně dokládají mikrostrukturu ZM, TOO a SK. Ze snímků je patrné, že zrna SK mají jemnější mikrostrukturu než zrna ZM. Mikroskopická kontrola svaru vzorku č. 12A neprokázala nepřipustné vady a proto je výsledek **vyhovující**.

Popis a hodnocení vzorku č. 12B:

Na obr. 33 ÷ 35 v Přílohách jsou snímky mikrostruktury vzorku č. 12B, nevytvrzeného po svařování pořízené ze středu tloušťky materiálu, zvětšeno 100x. Snímky postupně dokládají mikrostrukturu ZM, TOO a SK. Ze snímků je patrné, že zrna SK mají jemnější mikrostrukturu než zrna ZM. Mikroskopická kontrola svaru vzorku č. 12B neprokázala nepřipustné vady a proto je výsledek **vyhovující**.

5.3.4 Zkouška rázem v ohybu

Norma ČSN EN ISO 15614-2 nevyžaduje u hliníku a jeho slitin provedení této zkoušky, přesto byla provedena pro porovnání hodnot nárazové práce u nevytvrzených a vytvrzených vzorků za normální (+20°C) a snížené (-193°C) teploty.

Zkouška rázem v ohybu se provádí podle normy ČSN EN 10045-1 [34]. Norma ČSN EN 875 [35] předepisuje způsob značení umístění zkušebních tyčí, orientaci jejich vrubu pro zkoušku a záznam výsledků zkoušek rázem v ohybu tupých svarových spojů do protokolu.

Zkouška rázem v ohybu za snížených teplot se provádí dle ČSN 42 0382 [36].

Zkouška proběhla v mechanické zkušebně Třineckých železáren a.s. na zkušebním stroji Roell Amsler RKP 450 č. 9299-7-21 s nominální potenciální energií

300,10 J. Celkem byly 4 sady vzorků, v každé sadě 3 vzorky. Bylo provedeno zkoušení nevytvrzených a vytvrzených vzorků při teplotě +20°C a při -193°C za účelem srovnání hodnot nárazové práce.

První sada obsahovala vzorky nevytvrzené po svařování č. 2A, 2B, 2C, které byly odebrány ze zkušebního kusu č. 3 a zkoušeny při teplotě +20°C. Druhá sada obsahovala nevytvrzené vzorky č. 7A, 7B, 7C, které byly odebrány ze zkušebního kusu č. 3 a zkoušeny při teplotě -193°C, ochlazení vzorků proběhlo v kapalném dusíku (viz obr. 38 v Přílohách) teplota měřena teploměrem COMARK KM43 (viz obr. 39 v Přílohách). Třetí sada obsahovala vytvrzené vzorky č. 5A, 5B, 5C, které byly odebrány ze zkušebního kusu č. 1 a zkoušeny při teplotě +20°C. Čtvrtá sada obsahovala vytvrzené vzorky č. 6A, 6B, 6C, které byly odebrány ze zkušebního kusu č. 1 a zkoušeny při teplotě -193°C.

5.3.4.1 Porovnání výsledků zkoušky rázem v ohybu

Hodnota nárazové práce při +20°C použitého přídavného materiálu OK Tigrod 5183 je 30 J. Výrobce PM uvádí, že svarový kov se tepelně nezpracovává.

Hodnoty výsledků zkoušky rázem v ohybu jsou uvedeny v tabulce 18 a vyneseny v grafu na obr. 36 v Přílohách. Srovnání průměrných hodnot nárazové práce vzorků s hodnotou SK je graficky zpracováno na obr. 37 v Přílohách.

Nevytvrzené vzorky

Průměrná hodnota nárazové práce při teplotě +20°C nevytvrzených vzorků 2A, 2B, 2C, je 39,6J a ve srovnání se SK (30J při +20°C) je vyšší o 24,2%.

Průměrná hodnota nárazové práce při teplotě -193°C nevytvrzených vzorků 7A, 7B, 7C je 13,7J a ve srovnání s hodnotou při +20°C poklesla o **65,4%**. Ve srovnání s hodnotou SK (30J při +20°C) poklesla o 54,3%.

Vytvrzené vzorky

Průměrná hodnota nárazové práce při teplotě +20°C vzorků 5A, 5B, 5C, které byly vytvrzeny po svařování je 18,1J. Ve srovnání s hodnotou SK (30J při +20°C) poklesla o 39,6%. Obr. 40 v Přílohách dokumentuje lomové plochy vzorků 5A, 5B, 5C po provedené zkoušce.

Průměrná hodnota nárazové práce při teplotě -193°C vzorků 6A, 6B, 6C, které byly vytvrzeny po svařování je 8,8J. Průměrná hodnota nárazové práce při -193°C poklesla o **51,4%** oproti hodnotě nárazové práce při +20°C. Ve srovnání s hodnotou SK (30J při +20°C) poklesla o 70,6%.

5.3.5 Zkouška tvrdosti

Norma ČSN EN ISO 15614-2 nevyžaduje u hliníku a jeho slitin provedení této zkoušky, přesto byla provedena pro srovnání hodnot tvrdosti nevytvrzených a vytvrzených vzorků.

Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním se provádí podle normy ČSN EN 1043-1 [37]. Tato norma specifikuje zkoušky tvrdosti na příčných řezech svarových spojů a odpovídá zkouškám tvrdosti podle Vickerse v souladu s normou ČSN EN ISO 6507-1 [38] s běžným zkušebním zatížením 49 N nebo 98 N (HV 5 nebo HV 10). Pokud není stanoveno jinak, zkouška se provádí při teplotě okolí ($23 \pm 5^\circ\text{C}$).

Měření tvrdosti proběhlo v mechanické zkušebně Třineckých železáren a.s. na tvrdoměru č. 9299-7-20. Průběh tvrdosti byl měřen ve dvou směrech tj. ze strany svaru a ze strany kořene ve vzdálenosti 2,5 mm od okraje. Měření se provádělo na naleptaných vzorcích. Umístění základny měření 12,5 mm od osy svaru dokumentuje obr. 41 v Přílohách.

Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku č. 2A, odebraného ze zkušebního kusu č. 3, který nebyl vytvrzen po svaření (viz tabulka 19 v Přílohách),

Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku č. 5A, odebraného ze zkušebního kusu č. 1, vytvrzeného po svaření (viz tabulka 20 v Přílohách)

Porovnání průběhu tvrdosti vzorku č. 2A a 5A je graficky zpracováno na obr. 42 v Přílohách.

5.3.5.1 Porovnání výsledků zkoušky tvrdosti

Při srovnání výsledků hodnot tvrdosti nevytvrzeného vzorku č. 2A s vytvrzeným vzorkem č. 5A, lze konstatovat, že svarový kov si uchovává přibližně stejnou úroveň tvrdosti nezávisle na tepelném zpracování - vytvrzení.

Výrobce tyče, ze které byly zkušební kusy vyrobeny uvádí orientační hodnotu tvrdosti min. 75 HB. Průměrná hodnota tvrdosti základního materiálu nevytvrzeného vzorku č. 2A je 36,3 HV5. Srovnáním výsledků lze konstatovat, že teplo vnesené do svarového spoje a jeho okolí během svařování významným způsobem ovlivnilo původně vytvrzený základní materiál a projevilo se to mj. snížením hodnot tvrdosti. Průměrná hodnota tvrdosti základního materiálu vytvrzeného vzorku č. 5A je 101,6 HV5. Vytvrzením vzrostla hodnota tvrdosti o 180% oproti nevytvrzenému vzorku.

Vytvrzením vzorku po svařování se hodnota tvrdosti dostala na původní úroveň před svařováním anebo mírně vzrostla. Při měření nebylo zjištěno typické zvýšení hodnot tvrdosti v TOO, jak to bývá u ocelí.

6. Diskuse dosažených výsledků

V experimentální části bylo provedeno zavaření tří zkušebních kusů tupého spoje na trubce Ø 80 x 12 mm z hliníkové slitiny EN AW-6063 T66 dle předepsané pWPS. Poněvadž se jednalo o vytvrditelnou slitinu hliníku, u které po svařování dochází k podstatnému snížení pevnostních vlastností, bylo u dvou zkušebních kusů č. 1 a č. 2 provedeno precipitační zpevnění – vytvrzení a zkušební kus č. 3 zůstal ve stavu po svařování pro porovnání mechanických vlastností. Poté proběhla kontrola a zkoušení dle požadavků ČSN EN ISO 15614-2 článku 7 + zkoušení nad rámec této normy.

Provedené kontroly a zkoušky dle požadavků ČSN EN ISO 15614-2 článku 7:

Vizuální kontrola svarů – popis provedení a vyhodnocení zkoušky (viz kap. 5.2.1) Přepis protokolu vizuální kontroly (viz tabulka 13 v Přílohách). Výsledek je s ohledem na kritéria přípustnosti **vyhovující**.

Radiografická zkouška – popis provedení a vyhodnocení zkoušky (viz kap. 5.2.2) Přepis protokolu radiografické zkoušky (viz tabulka 14 v Přílohách). Výsledek je s ohledem na kritéria přípustnosti **vyhovující**.

Kapilární zkouška - popis provedení a vyhodnocení zkoušky (viz kap. 5.2.3) Přepis protokolu kapilární zkoušky (viz tabulka 15 v Přílohách). Výsledek je s ohledem na kritéria přípustnosti **vyhovující**.

Příčná zkouška tahem - popis provedení (viz kap. 5.3.1) a vyhodnocení zkoušky (viz kap. 5.3.1.1). Přepis protokolu příčné zkoušky tahem (viz tabulka 16 v Přílohách). Mez pevnosti vytvrzených vzorků č. 3, 4, 9 ve stavu po svařování vyhovuje požadavku stanovenému v čl. 7.4.2 výše uvedené normy. Mez pevnosti nevytvrzených vzorků č. 1 a č. 8 nevyhovuje tomuto požadavku, ale to se dalo očekávat, poněvadž se jedná o tepelně vytvrditelnou slitinu, která procesem svařování ztrácí původní úroveň mechanických vlastností. Pro uznání kvalifikace postupu svařování se započítávají výsledky meze pevnosti vytvrzených vzorků, které požadavek splnily, takže výsledek je s ohledem na kritéria přípustnosti **vyhovující**.

Příčná zkouška lámavosti – popis provedení a vyhodnocení zkoušky (viz kap. 5.3.2) Přepis protokolu příčné zkoušky lámavosti (viz tabulka 17 v Přílohách). Nebyly zjištěny žádné nepřipustné vady, jak na nevytvrzených vzorcích č. 10A a 10 B tak na

vytvrzených vzorcích č. 10C a 10D. Výsledek je s ohledem na kritéria přípustnosti **vyhovující**.

Makroskopická kontrola - popis provedení a vyhodnocení zkoušky (viz kap. 5.3.3.1) Makrosnímek nevytvrzeného vzorku č. 12A (viz obr. 28 v Přílohách). Makrosnímek vytvrzeného vzorku č. 12B (viz obr. 29 v Přílohách) Výsledek makrostruktury obou vzorků je s ohledem na kritéria přípustnosti **vyhovující**.

Mikroskopická kontrola - popis provedení a vyhodnocení zkoušky (viz kap. 5.3.3.2). Snímky mikrostruktury ZM, TOO a SK nevytvrzeného vzorku č. 12A (viz obr. 30÷32 v Přílohách). Snímky mikrostruktury ZM, TOO a SK vytvrzeného vzorku č. 12B (viz obr. 33÷35 v Přílohách). Výsledek mikrostruktury obou vzorků je s ohledem na kritéria přípustnosti **vyhovující**.

Provedené zkoušky nad rámec požadavků normy ČSN EN ISO 15614-2:

Zkouška rázem v ohybu - popis provedení (viz kap. 5.3.4) a porovnání výsledků zkoušky (viz kap. 5.3.4.1). Přepis protokolu zkoušky rázem v ohybu (viz tabulka 18 v Přílohách).

Celkem byly 4 sady vzorků, v každé sadě 3 vzorky. Bylo provedeno zkoušení nevytvrzených a vytvrzených vzorků při teplotě +20°C a při -193°C za účelem srovnání hodnot nárazové práce vzorků mezi sebou a hodnotou svarového kovu při teplotě +20°C uváděné výrobcem přídavného materiálu (viz grafy na obr. 36 a 37 v Přílohách). Zkouška rázem v ohybu za snížených teplot prokázala snížení hodnot nárazové práce v porovnání s hodnotami za normální teploty. Pro přesnější zhodnocení by bylo zapotřebí provést zkoušku na větším množství vzorků, což překračuje rámec této diplomové práce. Z důvodu toho, že norma nevyžaduje u hliníku a jeho slitin provedení této zkoušky není zde uvedeno, zda výsledky vyhovují či ne.

Zkouška tvrdosti - popis provedení (viz kap. 5.3.5) a porovnání výsledků zkoušky (viz kap. 5.3.5.1). Přepis protokolu zkoušky tvrdosti (viz tabulka 19 a 20 v Přílohách). Průběh tvrdosti obou vzorků zanesen do grafu (viz obr. 42 v Přílohách).

Při srovnání hodnot tvrdosti nevytvrzeného a vytvrzeného vzorku lze konstatovat, že aplikované precipitační zpevnění – vytvrzení nemělo žádný podstatný vliv na změnu tvrdosti svarového kovu, což jen potvrzuje tvrzení výrobce PM, že svarový kov se tepelně nezpracovává, ale na druhé straně mělo značný vliv na základní materiál a projevilo se to podstatným nárůstem hodnot tvrdosti na původní hodnoty

udávané jeho výrobcem. Z důvodu toho, že norma nevyžaduje u hliníku a jeho slitin provedení této zkoušky není zde uvedeno, zda výsledky vyhovují či ne.

Shrnutí:

Výsledky všech provedených zkoušek dle požadavků normy ČSN EN ISO 15614-2 pro kvalifikaci technologického postupu svařování jsou s ohledem na kritéria přípustnosti **vyhovující**. Výsledky provedených zkoušek nad rámec požadavků výše uvedené normy přispěly k hlubšímu poznání mechanických vlastností dané hliníkové slitiny za snížených teplot.

7. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navržení a realizování modelového spoje ke kvalifikaci technologického postupu svařování vytvrditelné hliníkové slitiny.

V teoretické části práce byla provedena studie používaných materiálů a jejich vlastností pro kryogenní teploty, mezi něž patří niklem legované oceli, austenitické korozivzdorné oceli, nikl a jeho slitiny, měď a její slitiny. Zvláštní pozornost byla věnována rozboru svařitelnosti, technologie a metod svařování hliníku a jeho slitin, jež je rovněž vhodným materiálem pro nízkoteplotní aplikace.

V experimentální části byl navržen a realizován modelový spoj ke kvalifikaci technologického postupu svařování (dle ČSN EN ISO 15614-2) vytvrditelné hliníkové slitiny EN AW-6063 T66, u které je potencionální uplatnění v kyslíkárně Linde Gas a.s. v Třinci.

Dle předepsané pWPS bylo provedeno zavaření tří zkušebních kusů výše uvedené hliníkové slitiny. Poněvadž se jednalo o vytvrditelnou slitinu hliníku, u které po svařování dochází k podstatnému snížení pevnostních vlastností, bylo u dvou zkušebních kusů č. 1 a č. 2 provedeno precipitační zpevnění – vytvrzení a zkušební kus č. 3 zůstal ve stavu po svařování pro porovnání mechanických vlastností. Dle požadavků článku 7.1 výše uvedené normy byly na všech třech zkušebních kusech provedeny nedestruktivní zkoušky svarových spojů, jejichž výsledek byl vyhovující a pak byly naděleny mechanickým způsobem na vzorky pro destruktivní zkoušky.

Pro zjištění chování této hliníkové slitiny za snížených teplot a potvrzení literárních pramenů byly provedeny některé zkoušky (zkouška vrubové houževnatosti a zkouška tvrdosti) nad rámec požadavků příslušné normy.

Byl proveden popis jednotlivých zkoušek s uvedením prováděcí normy a stupňů přípustnosti spolu s jejich vyhodnocením. V Přílohách jsou uvedeny přepisy příslušných protokolů, grafy, tabulky a fotografie zachycující průběh svařování a zkoušek.

Přínos této práce je v tom, že byly provedeny všechny požadované kontroly a zkoušky pro kvalifikaci postupu svařování hliníkové slitiny s vyhovujícím výsledkem, navíc některé zkoušky, které ověřily chování hliníkové slitiny za snížených teplot. Pro zadavatele to znamená rozšíření spektra materiálů na která obdrží kvalifikaci a tím se stává více konkurence schopným a atraktivnějším pro své zákazníky.

8. Seznam použitých pramenů

- [1] Jelínek, J., Málek, Z., Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982
- [2] Hrivňák, I., Teória zvariteľnosti kovov a Zliatin, Bratislava, Veda 1989
- [3] ČSN EN 10028-4, Ploché výrobky z ocelí pro tlakové nádoby a zařízení – Část 4: Oceli legované niklem se zaručenými vlastnostmi při nízkých teplotách, Praha: Český normalizační institut, prosinec 2004
- [4] ČSN EN 10027-1, Systémy označování ocelí - Část 1: Stavba značek ocelí, Praha: Český normalizační institut, duben 2006
- [5] Flynn, T., Cryogenic engineering, Edition: 2, Informa Health Care, November 2004, ISBN 9780824753672
- [6] Hrubý, V., Moneta, P., Silbernagel, A., Navrhování kovových materiálů pro různé výrobky, Ostrava: Kovosil, 2008, ISBN 978-80-903694-2-9
- [7] ČSN 42 0002, Číselné označování a rozdělení ocelí ke tváření, Praha: Úřad pro normalizaci a měření, prosinec 1976
- [8] Katalog přídatných materiálů pro svařování, ESAB Vamberk, květen 2007
- [9] ČSN EN ISO 4063, Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování, Praha: Český normalizační institut, září 2001
- [10] ISO 1190-1, Copper and copper alloys - Code of designation - Part 1: Designation of materials, November 1982
- [11] ČSN EN 573-1 Hliník a slitiny hliníku - Chemické složení a druhy tvářených výrobků - Část 1: Číselné označování, Praha: Český normalizační institut, červen 2005
- [12] ČSN EN 1706, Hliník a slitiny hliníku - Odlitky - Chemické složení a mechanické vlastnosti, Praha: Český normalizační institut, listopad 1999
- [13] Davis, J.R., Aluminum and aluminum alloys, ASM International Handbook Committee, March 1998, ISBN 0-87170-496-X
- [14] Michna, Š. a kol., Encyklopedie hliníku, Adin, s.r.o., Prešov 2005, ISBN 80-89041-88-4
- [15] Novotný, J., Zváranie hliníka, VÚZ Bratislava, 1984
- [16] Orságh, V., Orságh, P., Zváranie TIG ocelí a neželezných kovov, Bratislava SAV 1998, ISBN 80-88780-21-7
- [17] Koutný, J., Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování [online], 2006 [cit. 11. 5. 2009]. Dostupné na: <http://www.svarbazar.cz/phprs/storage/hlinik.pdf>

- [18] ČSN EN 1011-4, Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 4: Obloukové svařování hliníku a slitin hliníku, Praha: Český normalizační institut, srpen 2002
- [19] ČSN EN ISO 9692-3, Svařování a příbuzné procesy - Příprava svarových ploch - Část 3: Obloukové svařování hliníku a jeho slitin tavící se elektrodou v inertním plynu a wolframovou elektrodou v inertním plynu, Praha: Český normalizační institut, červen 2002
- [20] ČSN EN ISO 6947, Svařování - Pracovní polohy - Definice úhlů sklonu a otočení, Praha: Český normalizační institut, leden 1999
- [21] ČSN EN ISO 15614-2, Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování. Část 2: Obloukové svařování hliníku a jeho slitin, Praha: Český normalizační institut, leden 2006
- [22] TNI CEN ISO/TR 15 608, Svařování - Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin, Praha: Český normalizační institut, únor 2008
- [23] ČSN EN 970, Nedestruktivní zkoušení tavných svarů - Vizuální kontrola, Praha: Český normalizační institut, listopad 1998
- [24] ČSN EN ISO 10042, Svařování - Svarové spoje hliníku a jeho slitin zhotovené obloukovým svařováním - Určování stupňů jakosti, Praha: Český normalizační institut, srpen 2006
- [25] ČSN EN 473, Nedestruktivní zkoušení - Kvalifikace a certifikace pracovníků NDT - Všeobecné zásady, Praha: Český normalizační institut, leden 2009
- [26] ČSN EN 1435, Nedestruktivní zkoušení svarů - Radiografické zkoušení svarových spojů, Praha: Český normalizační institut, červen 1999
- [27] ČSN EN 571-1, Nedestruktivní zkoušení - Kapilární zkouška - Část 1: Obecné zásady, Praha: Český normalizační institut, listopad 1998
- [28] ČSN EN 1289, Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení svarů kapilární metodou - Stupně přípustnosti, Praha: Český normalizační institut, listopad 1999
- [29] ČSN EN 895, Destruktivní zkoušky svarových spojů kovových materiálů - Příčná zkouška tahem, Praha: Český normalizační institut, březen 1997
- [30] ČSN EN 10002-1, Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za okolní teploty, Praha: Český normalizační institut, únor 2002
- [31] ČSN 42 0313, Zkoušení kovů. Zkouška tahem za snížených teplot, Praha: Úřad pro normalizaci a měření, říjen 1984

- [32] ČSN EN 910, Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušky lámavosti, Praha: Český normalizační institut, prosinec 1997
- [33] ČSN EN 1321, Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů, Praha: Český normalizační institut, červenec 1998
- [34] ČSN EN 10045-1, Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho - Část 1: Zkušební metoda (V a U vruby), Praha: Český normalizační institut, červen 1998
- [35] ČSN EN 875, Destruktivní zkoušky svarových spojů kovových materiálů - Zkoušky rázem v ohybu - Umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení, Praha: Český normalizační institut, leden 1998
- [36] ČSN 42 0382, Zkoušení kovů. Zkouška rázem v ohybu za snížených teplot, Praha: Úřad pro normalizaci a měření, září 1978
- [37] ČSN EN 1043-1, Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkouška tvrdosti – Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním, Praha: Český normalizační institut, leden 1998
- [38] ČSN EN ISO 6507–1, Kovové materiály – zkouška tvrdosti podle Vickerse. Část 1: Zkušební metoda, Praha: Český normalizační institut, srpen 2006

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Vladislavu Ochodkovi, z katedry mechanické technologie VŠB-TU Ostrava za odborné vedení práce, poskytování rad a materiálových podkladů k práci.